



University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies
Vol. 49, No. 4, Winter 2024

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Analysis and Evaluation of Mercury Emissions as an Environmental Pollutant From Iran's Power Sector

Saeed Nazari Kudahi¹ 

1. Department of Environment, Energy and Environment Research Center, Niroy Research Institute, Tehran, Iran, Email: [Email: snazarikudahi@nri.ac.ir](mailto:snazarikudahi@nri.ac.ir)

Article Info

Research Article:
Research Paper

Article history:

Received 24 June 2023
Received in revised form
26 October 2023
Accepted 25 November 2023
Publish online 1 December
2023

Keywords:

*External costs of power
generation, Emission factor,
Mercury emissions, STIRPAT
model, Thermal power plants*

ABSTRACT

Thermal power plants are one of the most important sources of mercury emissions. Mercury deposition in nature has a negative implication on human health. According to Article 8 of the Minamata Convention, all parties are obliged to estimate mercury emissions from anthropogenic sources and provide the best available control technologies. In this research, the analysis of mercury emissions from Iran's power sector has been illustrated using the UNEP toolkit and the STIRPAT model for the period from 2011 to 2021. The average amount of mercury emissions and mercury emission factor were estimated as 505.6 kg and 1.85 kg/TWh respectively. The average emission factor of mercury for natural gas, heavy oil and gas oil combustion was calculated as 0.05 kg/TWh, 14 kg/TWh, and 1.29 kg/TWh respectively. The average amount of the external cost of electricity generation due to mercury emissions was calculated as 2,616.67 US\$/TWh and 5,931.11 US\$/TWh in two scenarios with and without the minimum exposure threshold respectively. The results of the STIRPAT model, it was indicated that a one-percent increase in factors including population, the share of electricity generation from natural-gas consumption, and the share of electricity generation from liquid fuels consumption led to an increase of 14.83, 0.3 and 1.49 percent respectively in mercury emissions. In addition, as a result of a one-percent increase in factors including gross national product per capita, intensity of electric energy generation and the share of electricity generation using non-fossil sources led to a decrease of 4.8, 4.74 and 0.15 percent respectively in mercury emissions.

Cite this article: Nazari Kudahi, S. (2024). Analysis and Evaluation of Mercury Emissions as an Environmental Pollutant From Iran's Power Sector. *Journal of Environmental Studies*, 49 (4), 421- 436.
DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.360488.1008419>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.360488.1008419>

Expanded Summary**Introduction**

Mercury is one of the most dangerous environmental pollutants that can cause toxic effects on humans due to its chemical composition. Article 8 of the Minamata Convention obliges all parties to report the amount of mercury emission from various anthropogenic sources. Thermal power plants are one of those sources of mercury emissions into the atmosphere. Between 2011 and 2021, thermal power plants will produce an average approximately 92% of Iran's electricity. Based on the very high proportion of electricity generated by fossil fuels, the evaluation of mercury emissions from these sources is very critical. This paper presents the amount of mercury emissions from Iran's power sector and the factors affecting mercury emissions from this sector using the STIRPAT model.

Materials and Methods

A toolkit provided by UNEP was used to estimate mercury emissions in Iran's power sector, and the factors influencing mercury emissions in that sector were determined using the STIRPAT model. In this model, the term "I" refers to the index of the impact on the environment, the term P is the population size, the term A is a function of the amount of wealth in terms of GDP per capita and the term T is a function of the level of technology (energy intensity). This model is introduced by equation (1). In this model, a, b, c, and d are the constants of the model, the population factor, the wealth factor, the technology factor, and the model error rate, respectively. In this research, to investigate other factors affecting the amount of mercury emissions, such as the consumption of fossil fuel sources and non-fossil fuel sources in electricity generation, several terms related to the share of electricity generation resulting from the consumption of natural gas (NG), heavy oil and gas oil as the liquid fuel (LF) and the use of electricity resources including, hydro, renewable and nuclear energy (NFER) from the country's total electricity generation have been added to equation (1). In this extended STIRPAT model (Equation.2), f, g, and h are the constants related to the above-mentioned extended parameters.

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times e \quad \text{Equation.1}$$

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times NG^f \times LF^g \times NFER^h \times e \quad \text{Equation.2}$$

Discussion

According to the results obtained from the STIRPAT model, the order of the effect of positive factors affecting mercury emissions from Iran's power sector is illustrated as this expression: population > share of electricity generation due to the consumption of liquid fuels > share of electricity generation due to the consumption of natural gas. The positive effect of population factor and the share of electricity generation due to the consumption of liquid fuels is 49.43 times and 4.96 times higher than the effect of the share of electricity generation due to the consumption of natural gas on the amount of mercury emissions. The significant effect of the population on the amount of mercury emissions shows the effect of this factor on the demand for electricity consumption in the country, especially in the domestic and agricultural sectors. Also, the order of the effect of negative factors on mercury emissions from Iran's power sector is illustrated as this expression: per capita GDP > intensity of electricity generation > share of electricity generation using non-fossil resources such as hydro, renewable energy and nuclear power. The negative impact of per capita GDP factor and the intensity of electricity generation is approximately 32 times higher than the impact of the factor of the share of electricity generation using non-fossil sources such as hydro, renewable and nuclear power on the amount of mercury emissions from the country's electricity generation sector.

Conclusions

The results of this study show that mercury emissions from Iran's power sector decreased with a slope of 3.54 kg/year. The average emission factor for consuming gas oil and heavy fuel oil are 280 times and 26 times higher than this factor for consuming natural gas, respectively. In addition, the average mercury emissions and its emission factor were assessed as 505.6 kg and 1.85 kg/TWh, respectively. Develop policies and use new energy-saving technologies to manage electricity consumption on the demand side, as well as increase the share of electricity generation from non-fossil sources such as hydropower, renewable energy, and nuclear power, will lead to a decrease in mercury emissions. The effect of the share of electricity generation from liquid fuels in increasing mercury emissions is approximately five times greater than the effect of the share of power generation from natural gas. This finding shows that increasing the share of electricity generation from natural gas is one of the effective methods to control mercury emissions.



تحلیل و ارزیابی انتشار جیوه به عنوان یک آلاینده محیط‌زیستی از بخش تولید برق کشور

سعید نظری کودهی^۱

۱. گروه پژوهشی محیط زیست، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، رایانامه: snazarikudahi@nri.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	نیروگاه‌های حرارتی از مهمترین منابع انتشار جیوه می‌باشند. ترسیب جیوه به عنوان یک آلاینده محیط‌زیستی در طبیعت تاثیر منفی بر سلامت انسان دارد. مطابق ماده ۸ کنوانسیون میناماتا کشورهای عضو موظف به تخمین انتشار جیوه از منابع انسان‌ساخت و ارائه بهترین روش‌های کنترلی هستند. در این تحقیق تحلیل و ارزیابی انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور در افق زمانی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از داده‌های سوخت مصرفی نیروگاه‌ها، جعبه ابزار ارائه شده توسط UNEP و مدل STIRPAT انجام شده است. مطابق نتایج این تحقیق، میزان میانگین انتشار جیوه و ضریب انتشار جیوه در بخش تولید برق کشور در بازه زمانی مورد مطالعه به ترتیب $۵۰۵/۶ \text{ kg/TWh}$ و $۱/۸۵$ بوده است. میانگین ضریب انتشار جیوه برای گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل به ترتیب $۰/۰۵ \text{ kg/TWh}$ ، $۰/۰۵ \text{ kg/TWh}$ و ۱۴ و $۱/۲۹ \text{ kg/TWh}$ محاسبه شده است. میانگین هزینه خارجی ناشی از انتشار جیوه در حدود $۲۶۱۶/۶۷ \text{ US}\$/\text{TWh}$ و $۵۹۳۱/۱۱ \text{ US}\$/\text{TWh}$ به ترتیب با لحاظ حداقل میزان مواجهه و بدون لحاظ حداقل میزان مواجهه محاسبه گردیده است. نتایج مدل STIRPAT نشان داد که افزایش یک درصدی عواملی مشتمل بر جمعیت، سهم تولید برق از مصرف گاز طبیعی و سهم تولید برق از مصرف سوخت‌های مایع موجب افزایش به ترتیب $۱۴/۸۳$ ، $۰/۳$ و $۱/۴۹$ درصدی در میزان انتشار جیوه شده است. همچنین افزایش یک درصدی عواملی مشتمل بر تولید ناخالص ملی، شدت تولید انرژی الکتریکی و سهم تولید برق با استفاده از منابع غیر فسیلی موجب کاهش به ترتیب $۴/۸$ ، $۴/۷۴$ و $۰/۱۵$ درصدی در میزان انتشار جیوه گردیده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۰۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰	
کلیدواژه‌ها:	
انتشار جیوه، ضریب انتشار، مدل STIRPAT، نیروگاه‌های حرارتی، هزینه‌های خارجی تولید برق	

استناد: نظری کودهی، سعید. (۱۴۰۲). تحلیل و ارزیابی انتشار جیوه به عنوان یک آلاینده محیط‌زیستی از بخش تولید برق کشور. نشریه محیط‌شناسی، ۴۹ (۴)، ۴۲۱-۴۳۶.

DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.360488.1008419>

DOR: 20.1001.1.10258620.1402.49.4.2.8

© نویسندگان.

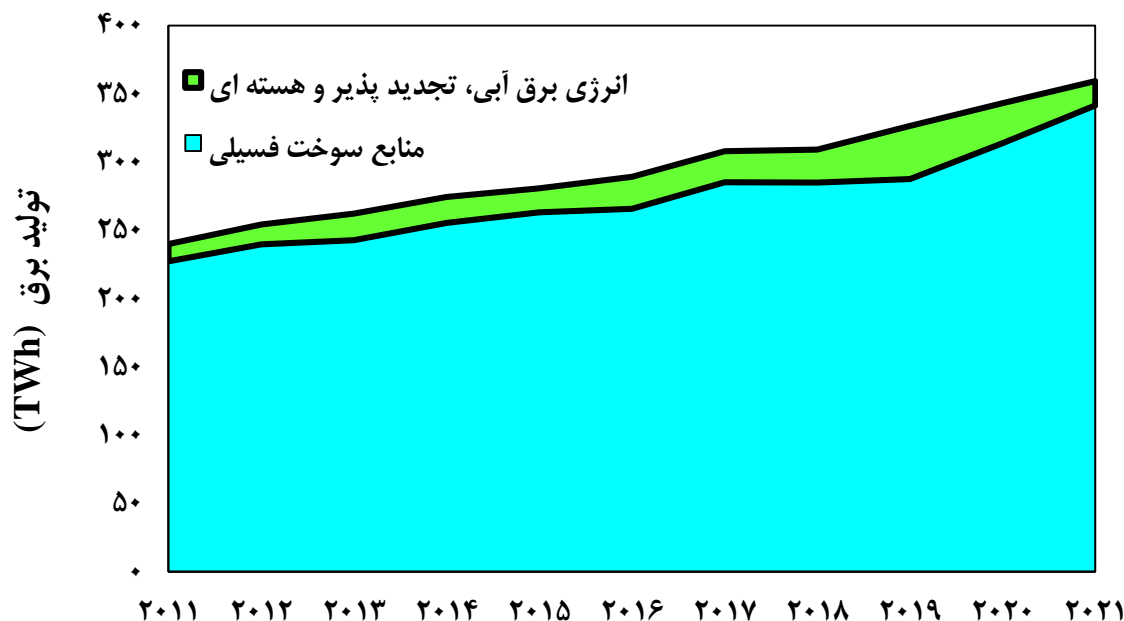
ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



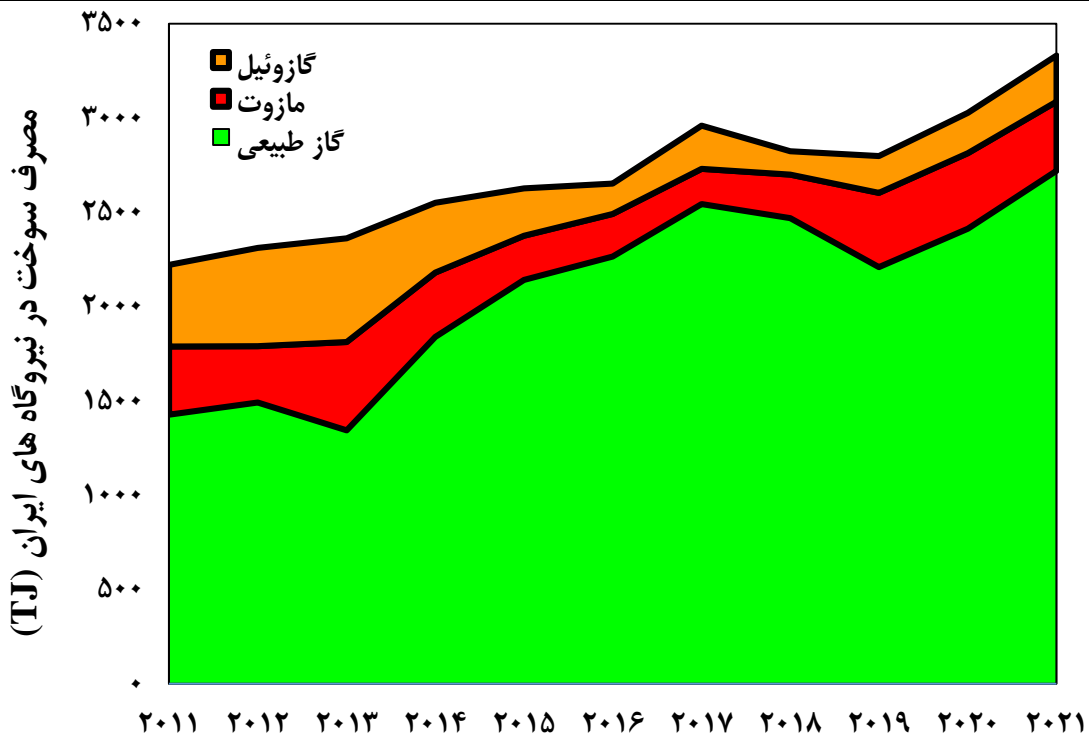
DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.360488.1008419>

۱. مقدمه

جیوه از خطرناک‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی بوده که با توجه به ترکیب شیمیایی آن در طبیعت، اثرات سمی شناخته شده‌ای برای انسان ایجاد می‌کند. جیوه از راه تنفس، گوارش و نیز از طریق پوست قابل جذب می‌باشد. متیل جیوه خطرناک‌ترین شکل جیوه است که ورود آن به بدن انسان موجب کاهش ضریب هوشی در کودکان و آسیب به سیستم عصبی، سیستم عصبی تکاملی و بیماری‌های قلبی می‌گردد (EPA, 2023a). به منظور کنترل انتشار و رهاسازی جیوه به محیط‌زیست از منابع انسان‌ساخت معاهده‌ای با عنوان «کنوانسیون میناماتا برای جیوه» در اکتبر ۲۰۱۳ به امضای کشورهای عضو رسید و کشور ایران به طور رسمی در ژوئن ۲۰۱۷ به این کنوانسیون پیوست (MCM, 2021). مطابق ماده ۸ کنوانسیون میناماتا کشورهای عضو موظف به ارائه میزان انتشار جیوه از منابع مختلف انسان‌ساخت هستند. نیروگاه‌های حرارتی به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی یکی از این منابع انتشار جیوه به جو می‌باشند (MCM, 2021). مطابق شکل (۱) در فاصله سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱، به طور میانگین در حدود ۹۲ درصد از برق کشور توسط نیروگاه‌های حرارتی (بخاری، گازی و سیکل ترکیبی) و با استفاده از سوخت‌های فسیلی مشتعل بر گاز طبیعی، مازوت (نفت کوره) و گازوئیل و در حدود ۸ درصد از نیروگاه‌های برق آبی، تجدیدپذیر و هسته‌ای تولید شده است (TAVANIR, 2023). این سوخت‌ها دارای مقادیر اندکی از جیوه می‌باشند که پس از احتراق از دودکش نیروگاه‌های حرارتی به جو منتشر می‌شوند. مطابق شکل (۲) در فاصله سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲، به طور میانگین ۲۶۹۶/۷ تراژول انرژی حرارتی برای تولید برق کشور مورد استفاده قرار گرفته است که سهم میانگین گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل به ترتیب ۷۶/۲۱ درصد، ۱۲ درصد و ۱۱/۷۱ درصد بوده است. با توجه به درصد بسیار بالای تولید برق از سوخت‌های فسیلی در کشور تخمین میزان انتشار جیوه از این منابع ثابت انتشار با توجه به مفاد کنوانسیون میناماتا برای جیوه از اهمیت بالایی برخوردار بوده و برای اولین بار میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی ایران به همراه تحلیل عوامل موثر بر انتشار آن با استفاده از مدل^۱ STIRPAT گزارش می‌شود.



شکل ۱: میزان تولید برق ایران از منابع سوخت فسیلی و منابع غیر فسیلی (TAVANIR, 2023)



شکل ۲: میزان انرژی حرارتی مورد نیاز به تفکیک سوخت‌های مختلف جهت تولید برق در ایران (TAVANIR, 2023)

۲. پیشینه پژوهش

۲-۱. پیشینه نظری

جهت تخمین انتشار آلاینده‌های خروجی از نیروگاه‌های حرارتی، روش‌ها و رویکردهای مختلفی وجود دارد. بر اساس مستندات و مدارک ارائه شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا از سال ۱۹۷۲ برای محاسبه انتشار آلاینده‌های خروجی از صنایع مختلف از جمله نیروگاه‌های حرارتی، روش‌های مختلفی نظیر استفاده از سیستم‌های پایش مداوم دود، سیستم‌های پایش پیش‌بینی‌کننده انتشار، اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها در دود خروجی، موازنه جرمی، مدل‌سازی، استفاده از ضرایب انتشار آلاینده‌های خروجی از دودکش و قضاوت مهندسی وجود دارند (EPA, 2023b). استفاده از سیستم‌های پایش مداوم بهترین روش جهت تخمین انتشار آلاینده‌ها می‌باشد اما هزینه نصب، راه‌اندازی و بهره‌برداری بالایی دارد (EPA, 2023b). در مرحله بعدی استفاده از سیستم‌های پایش پیش‌بینی‌کننده انتشار توصیه می‌شود. این سیستم‌ها هزینه نصب، راه‌اندازی و بهره‌برداری بسیار کمتری نسبت به سیستم‌های پایش مداوم متداول داشته و استفاده از این سیستم‌ها در نقاط مختلف جهان در حال توسعه است اما استفاده از این سیستم‌ها نیازمند حجم وسیعی از داده‌های فرآیندی و بهره‌برداری جهت مدل‌سازی ریاضی می‌باشد (Si et al., 2019). لذا استفاده از روش‌های آزمون منبع انتشار با استفاده از آنالیزهای قابل حمل، استفاده از روش موازنه جرم و استفاده از ضرایب انتشار آلاینده‌ها که ضریب اطمینان بالا و هزینه کمتری نسبت به سیستم‌های پایش مداوم دود دارند به منظور تخمین انتشار آلاینده‌ها بیشتر از سایر روش‌ها استفاده می‌شوند (EPA, 2023b). جهت تخمین انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی نیز روش‌های آزمون منبع انتشار با استفاده از آنالیز جیوه (Pilar et al., 2021)، استفاده از روش موازنه جرمی (Thepanondh and Tunlathorntham, 2020) و استفاده از ضرایب انتشار جیوه که توسط نهادهای معتبری نظیر UNEP^۱ توسعه داده شده‌اند استفاده می‌شود (UNEP, 2023). هزینه استفاده از ضرایب انتشار جیوه جهت تخمین انتشار جیوه از منابع انسان‌ساخت نسبت به دو روش موازنه

جرمی و آزمون منبع انتشار با استفاده از آنالیزر جیوه به مراتب کمتر است. لذا در این تحقیق از این روش جهت محاسبه انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور استفاده شده است (EPA, 2023b).

۲-۲. پیشینه تجربی

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی توسط محققان جهت تخمین انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی در کشورهای مختلف جهان ارائه شده است. در سال ۲۰۱۸، Liu و همکاران، انتشار جیوه از نیروگاه‌های ذغال‌سنگ سوز چین را بر اساس محاسبه میزان محتوی جیوه در ذغال‌سنگ مصرفی نیروگاه‌ها گزارش کردند. در سال ۲۰۱۸، Wu و همکاران، حدود مجاز انتشار جیوه به جو از نیروگاه‌های ذغال‌سنگ سوز به منظور تحقق اهداف کنوانسیون میناماتا برای جیوه را مورد بررسی قرار دادند (Wu et al., 2018). در سال ۲۰۱۹، Bourtsalas و Themelis، منابع اصلی انتشار از منابع انسان‌ساخت در ایالات متحده آمریکا را معرفی و میزان انتشار از هرکدام از این منابع را ارائه کردند (Bourtsalas & Themelis, 2019). در سال ۲۰۱۹، Sun و همکاران، میزان نرخ نشر جرمی جیوه از نیروگاه‌های ذغال‌سنگ سوز ایالات متحده آمریکا را برآورد نمودند (Sun et al., 2019). در سال ۲۰۲۰، Thepanondh و Tunlathorntham، نرخ انتشار جیوه از یک نیروگاه ۲۴۰۰ مگاواتی واقع در تایلند که از لیگنیت^۱ به عنوان سوخت استفاده می‌کرد را با استفاده از مدل iPOG^۲ گزارش دادند (Thepanondh & Tunlathorntham, 2020). در سال ۲۰۲۰، Wu و همکاران، انتشار جیوه از نیروگاه ذغال‌سنگ سوز چین در برخی از شهرهای کشور چین و تاثیر عواملی نظیر تولید ناخالص ملی، سهم ذغال‌سنگ در سبد انرژی مورد نیاز شهرها و جمعیت شهرها بر میزان انتشار این آلاینده را گزارش نمودند (Wu et al., 2020). در سال ۲۰۲۰، Charvát و همکاران انتشار جیوه از واحدهای مختلف تولید انرژی مشتمل بر نیروگاه‌های ذغال‌سنگ سوز، واحدهای تولید برق از زیست توده، زباله‌سوزها و نیروگاه‌های برق آبی (به عنوان یکی از منابع انتشار غیرمستقیم جیوه به محیط‌زیست) را مورد مطالعه قرار دادند (Charvát et al., 2020). در سال ۲۰۲۱، Pilar و همکاران، میزان انتشار جیوه از سه نیروگاه لیگنیت سوز را در کشور چک از طریق اندازه‌گیری غلظت جیوه در دود خروجی نیروگاه‌ها مورد مطالعه قرار دادند (Pilar et al., 2021). در سال ۲۰۲۱، Agarwalla و همکاران، میزان انتشار جیوه از چهار نیروگاه ذغال‌سنگ سوز و یک نیروگاه لیگنیت سوز را از طریق اندازه‌گیری غلظت جیوه در دود خروجی این نیروگاه‌ها مورد بررسی قرار دادند (Agarwalla et al., 2021). در سال ۲۰۲۱، Li و Wang، اثر واحدهای سولفورزدایی از دود و نیز کنترل انتشار NOx بر انتشار جیوه را از نه نیروگاه ذغال‌سنگ سوز کشور چین از طریق اندازه‌گیری جیوه در طول مسیر دود تا خروجی دودکش مطالعه کردند (Li and Wang, 2021). در سال ۲۰۲۱، Chou و همکاران، تاثیر واحدهای سولفورزدایی از دود و نیز کنترل انتشار NOx بر انتشار جیوه را از چهار نیروگاه ذغال‌سنگ سوز کشور تایوان از طریق اندازه‌گیری جیوه در طول مسیر دود تا خروجی دودکش بررسی کردند (Chou et al., 2021). در سال ۲۰۲۱، Thao و همکاران، فهرست انتشار جیوه از منابع انسان‌ساخت کشور تایلند مشتمل بر نیروگاه‌های ذغال‌سنگ سوز این کشور را با استفاده از ضریب انتشار جیوه و داده‌های فعالیت واحدهای مختلف صنعتی ارائه نمودند (Thao et al., 2021). در سال ۲۰۲۱، Zhang و همکاران تاثیر انتشار جیوه بر سلامت انسان در مقایسه جهانی را مورد تحلیل قرار دادند (Zhang et al., 2021). در سال ۲۰۲۲، MacFarlane و همکاران تغییرات ۲۰ سال اخیر در میزان انتشار جیوه از منابع انسان‌ساخت در کشور استرالیا مشتمل بر توسعه فهرست انتشار و پیش‌بینی روند آینده انتشار جیوه در این کشور را گزارش نمودند (MacFarlane et al., 2022). در سال ۲۰۲۳، Huang و همکاران میزان انتشار جیوه و گونه‌های شیمیایی جیوه در دود خروجی یک نیروگاه ذغال‌سنگ سوز مجهز به واحد سولفورزدایی با استفاده از آب دریا را مورد مطالعه قرار دادند (Huang et al., 2023).

در تمامی این تحقیقات صرفاً میزان انتشار و تاثیر فناوری‌های مختلف پیش و پس از احتراق بر کنترل انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشورهای مختلف جهان گزارش شده است و تاثیر شاخص‌های کلان اجتماعی، اقتصادی، سبد سوخت مصرفی و سایر روش‌های تولید برق مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق شکاف تحقیقاتی در خصوص تعیین ارتباط انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی ایران

1. Lignite
2. Interactive Process Optimization Guidance

با شاخص‌های کلان اقتصادی، اجتماعی، سبد سوخت مصرفی و سایر روش‌های تولید برق مشتمل بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۲. مدل مفهومی

به منظور اندازه‌گیری تاثیر وارد شده بر محیط‌زیست از سمت نیروهای محرک موثر از مدل IPAT که در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی مطرح گردید استفاده می‌شود. در این مدل که توسط رابطه (۱) ارائه می‌شود، I شاخص تاثیر وارد شده بر محیط‌زیست، P میزان جمعیت، A تابعی از میزان ثروت بر حسب سرانه تولید ناخالص ملی و T تابعی از سطح فناوری (شدت مصرف انرژی) می‌باشد. در مدل IPAT، فرض شده است که I تحت تاثیر سه نیروی محرک، یعنی، P، A و T قرار دارد (Skånberg & Svenfelt, 2022). علاوه بر این در این مدل فرض شده است که I متناسب با عوامل مختلف یاد شده می‌باشد. از این‌رو، مدل IPAT به علت رابطه تناسب مستقیم فشار وارده بر محیط‌زیست و نیروهای محرک موثر بر آن، دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. بنابراین محققین در سال ۲۰۰۳ مدل STIRPAT را با یک فرم تصادفی براساس چارچوب اولیه مدل IPAT معرفی نمودند. این مدل به وسیله رابطه (۲) ارائه می‌گردد (Fan et al., 2006). در این رابطه a, b, c, d و e به ترتیب ثابت مدل، ضریب عامل جمعیت، ضریب عامل ثروت، ضریب عامل فناوری و میزان خطای مدل هستند. به منظور تعیین این ضرایب از طرفین رابطه (۸) لگاریتم طبیعی گرفته می‌شود و با استفاده از رگرسیون خطی چند پارامتری، این ضرایب و ثابت‌ها تعیین می‌شوند (Fan et al., 2006). بنابراین رابطه (۳) جهت تعیین ضرایب ارائه می‌شود.

$$I = P \times A \times T \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$I = aP^b A^c T^d e \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\ln I = \ln a + b(\ln P) + c(\ln A) + d(\ln T) + \ln e \quad \text{رابطه (۳)}$$

در سال‌های اخیر استفاده از مدل STIRPAT در تحقیقات سایر محققین در کشورهای مختلف دنیا به منظور تعیین عوامل مختلف بر انتشار آلاینده‌های هوا و گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Chekouri et al., 2020; Thio et al., 2021; Xu et al., 2021; Yu et al., 2023; Li and Li, 2023; Lohwasser and Schaffer, 2023; Ojaghlou et al., 2023; Liu et al., 2023; Chen et al., 2023; Wei et al., 2023).

۳. روش شناسی پژوهش

۳-۱. روش تخمین انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی

به منظور تخمین انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور از جعبه ابزار^۱ ارائه شده توسط UNEP استفاده شده است. به این منظور از روابط (۴ تا ۶) جهت تخمین انتشار این آلاینده به تفکیک سوخت‌های گاز طبیعی^۲، مازوت^۳ و گازوئیل^۴ استفاده شده است (UNEP, 2023). اطلاعات مرتبط با میزان مصرف هر سوخت و تولید انرژی الکتریکی از کتابچه آمار تفصیلی صنعت برق کشور در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲ استخراج گردیده است (TAVANIR, 2023).

$$\text{Mercury emissions by NG} = \text{Natural gas consumption per annum (Nm}^3) \times 0.2 \mu\text{g} \frac{\text{Hg}}{\text{Nm}^3} \text{NG} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\text{Mercury emissions by HO} = \text{Heavy oil consumption per annum (ton)} \times 55 \text{ mg} \frac{\text{Hg}}{\text{ton}} \text{HO} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\text{Mercury emissions by GO} = \text{Gasoil consumption per annum (ton)} \times 5.5 \text{ mg} \frac{\text{Hg}}{\text{ton}} \text{GO} \quad \text{رابطه (۶)}$$

1. Toolkit
2. Natural Gas (NG)
3. Heavy Oil (HO)
4. Gasoil (GO)

همچنین جهت محاسبه ضریب انتشار جیوه نیروگاه‌های حرارتی کشور از رابطه (۷) استفاده شده است. به منظور محاسبه ضرایب انتشار جیوه برای سوخت‌های گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل از روابط (۸ تا ۱۰) استفاده شده است.

$$\text{Mercury emission factor} \left(\frac{\text{kg}}{\text{TWh}} \right) = \frac{\text{Total Mercury emissions per annum (kg)}}{\text{Electricity generation by fossil energy sources per annum (TWh)}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\text{Mercury emission factor for NG consumption} \left(\frac{\text{kg}}{\text{TWh}} \right) = \frac{\text{Mercury emissions per annum by NG (kg)}}{\text{Electricity generation by NG (TWh)}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\text{Mercury emission factor for HO consumption} \left(\frac{\text{kg}}{\text{TWh}} \right) = \frac{\text{Mercury emissions per annum by HO (kg)}}{\text{Electricity generation by HO (TWh)}} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\text{Mercury emission factor for GO consumption} \left(\frac{\text{kg}}{\text{TWh}} \right) = \frac{\text{Mercury emissions per annum by GO (kg)}}{\text{Electricity generation by GO (TWh)}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

۲-۳. روش تخمین هزینه خارجی ناشی از انتشار جیوه در بخش تولید برق کشور

به منظور تخمین هزینه خارجی ناشی از انتشار جیوه نیروگاه‌های حرارتی کشور از رابطه (۱۱) استفاده گردیده است. این رابطه با فرض حداقل دز مواجهه با $[\text{HgCH}_3]^+$ به میزان $6/7$ میکروگرم در روز ارائه شده است (Spadaro & Rabl, 2008).

$$\text{External cost of mercury emissions} \left(\frac{\text{US\$}}{\text{TWh}} \right) = \frac{\text{Total mercury emissions per annum (kg)} \times 1500 \left(\frac{\text{US\$}}{\text{kg}} \right)}{\text{Total electricity generation per annum (TWh)}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

با فرض اینکه حداقل دز مواجهه با $[\text{HgCH}_3]^+$ وجود نداشته باشد از رابطه (۱۲) استفاده می‌گردد (Spadaro and Rabl, 2008).

$$\text{External cost of mercury emissions} \left(\frac{\text{US\$}}{\text{TWh}} \right) = \frac{\text{Total mercury emissions per annum (kg)} \times 3400 \left(\frac{\text{US\$}}{\text{kg}} \right)}{\text{Total electricity generation per annum (TWh)}} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

۳-۳. روش تعیین عوامل موثر بر انتشار جیوه با استفاده از مدل STIRPAT

در این تحقیق جهت بررسی سایر عوامل تاثیرگذار بر میزان انتشار جیوه نظیر استفاده از منابع سوخت فسیلی و منابع غیرفسیلی در تولید برق چند جمله مرتبط با درصد تولید برق ناشی از مصرف گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل (سوخت مایع) و استفاده از منابع برق آبی، تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای از کل تولید برق کشور به رابطه شماره (۳) اضافه شده است و رابطه نهایی به صورت رابطه (۱۳) ارائه می‌شود. در این رابطه NG^1 ، LF^1 و $NFER^2$ به ترتیب سهم انرژی الکتریکی تولیدی ناشی از مصرف گاز طبیعی، سوخت مایع و منابع غیر فسیلی در تولید کل برق کشور می‌باشند و f ، g و h نیز ضرایب این جملات اضافه شده هستند. داده‌های مرتبط با جمعیت و تولید ناخالص ملی از اطلاعات ارائه شده توسط بانک جهانی استخراج شده است (WB, 2023). در این رابطه جمعیت برحسب میلیون نفر، سرانه ناخالص ملی بر حسب دلار به ازای هر نفر جمعیت کشور، شدت تولید انرژی الکتریکی برحسب کیلووات ساعت بر دلار می‌باشد. با استفاده از رگرسیون خطی چند پارامتری، این ضرایب و ثابت‌ها تعیین می‌شوند.

$$\ln I = \ln a + b(\ln P) + c(\ln A) + d(\ln T) + f(\ln NG) + g(\ln LF) + h(\ln NFER) + \ln e \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

۴. یافته‌های پژوهش

۴-۱. تخمین انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور

مطابق شکل (۳)، در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ میزان انتشار جیوه تغییرات نامنظمی داشته است. بیشترین مقدار انتشار جیوه در

1. Liquid fuel
2. Non-fossil energy resources

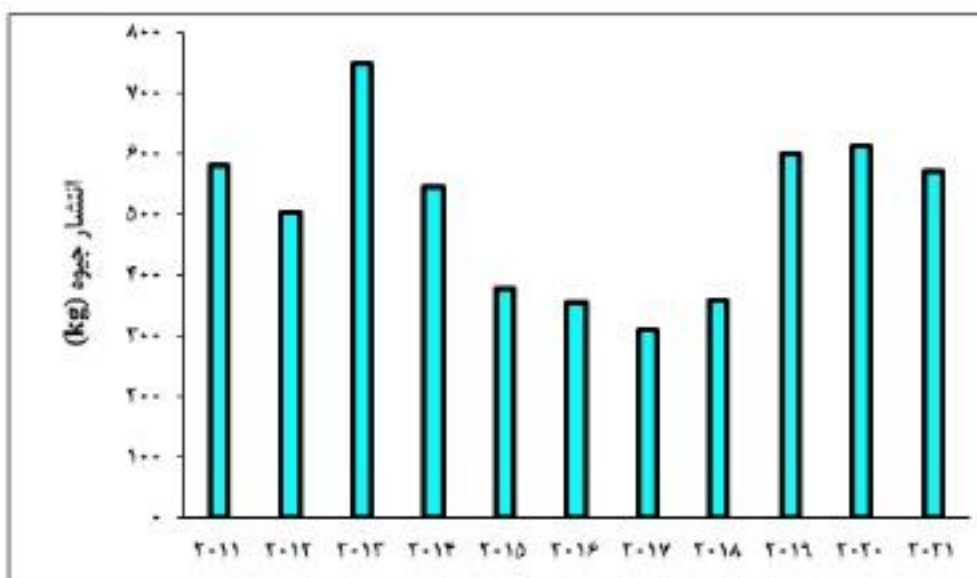
سال ۲۰۱۳ و کمترین میزان آن در سال ۲۰۱۷ به ترتیب $۷۴۸/۴۳$ کیلوگرم و $۳۰۹/۸$ کیلوگرم محاسبه گردیده است. در این دوره زمانی میزان میانگین انتشار جیوه در حدود $۵۰۵/۶$ کیلوگرم بوده است.

مطابق شکل (۴) روند تغییرات میانگین سالیانه ضریب انتشار جیوه با لحاظ تولید انرژی الکتریکی از منابع سوخت‌های فسیلی (گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل) مشابه روند تغییرات میزان انتشار جیوه است. بیشترین مقدار آن در سال ۲۰۱۳ و کمترین میزان آن در سال ۲۰۱۷ به ترتیب $۳/۰۸$ کیلوگرم بر تراوات ساعت و $۱/۰۹$ کیلوگرم بر تراوات ساعت است. میزان میانگین ضریب انتشار جیوه در بازه زمانی این تحقیق در حدود $۱/۸۵$ کیلوگرم بر تراوات ساعت محاسبه شده است. مطابق این شکل میانگین ضریب انتشار جیوه به تفکیک سوخت‌های گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل در دوره زمانی این تحقیق به ترتیب $۰/۰۵$ کیلوگرم بر تراوات ساعت، ۱۴ کیلوگرم بر تراوات ساعت و $۱/۲۹$ کیلوگرم بر تراوات ساعت بوده است. میانگین ضریب انتشار جیوه ناشی از مصرف سوخت گاز طبیعی در کل بازه زمانی این تحقیق ثابت بوده است.

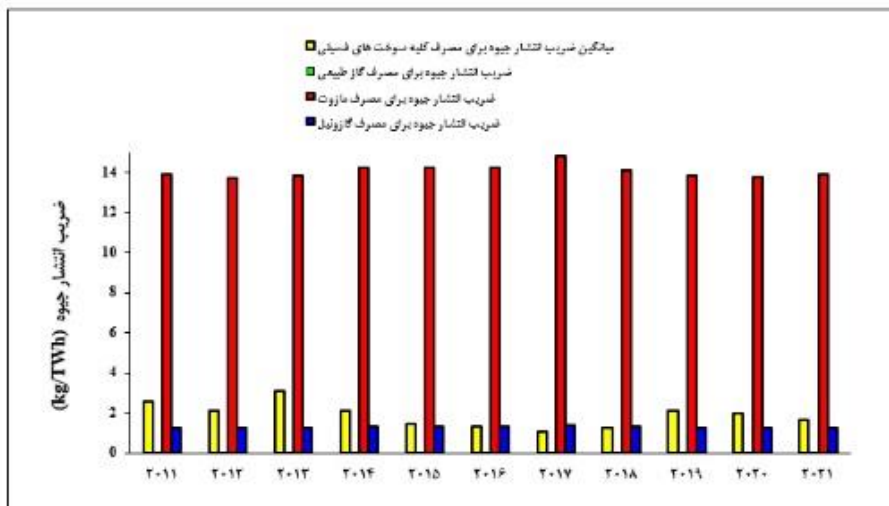
بیشترین میزان ضریب انتشار جیوه ناشی از مصرف سوخت مازوت $۱۴/۸$ کیلوگرم بر تراوات ساعت در سال ۲۰۱۷ و کمترین میزان آن $۱۳/۷۴$ کیلوگرم بر تراوات ساعت در سال ۲۰۱۲ بوده است. همچنین بیشترین میزان ضریب انتشار جیوه ناشی از مصرف سوخت گازوئیل $۱/۳۶$ کیلوگرم بر تراوات ساعت در سال ۲۰۱۷ و کمترین میزان آن $۱/۲۷$ کیلوگرم بر تراوات ساعت در سال ۲۰۱۲ بوده است. به طور میانگین سهم تولید برق در کشور با استفاده از سوخت‌های فسیلی مشتمل بر گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل به ترتیب $۷۶/۲۲$ درصد، $۱۲/۰۶$ درصد و $۱۱/۷۲$ درصد در دوره زمانی این تحقیق بوده است. وزن بیشتر تولید برق از سوخت‌های فسیلی ناشی از مصرف گاز طبیعی تاثیر بسیار زیادی بر میانگین ضریب انتشار جیوه در بازه زمانی این تحقیق داشته است. بنابراین تدوین سیاست مصرف بیشتر گاز طبیعی در نیروگاه‌های حرارتی موجب کاهش میانگین ضریب انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور خواهد شد.

در شکل (۵)، میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور به ترتیب مربوط به مصرف مازوت و گاز طبیعی می‌باشد.

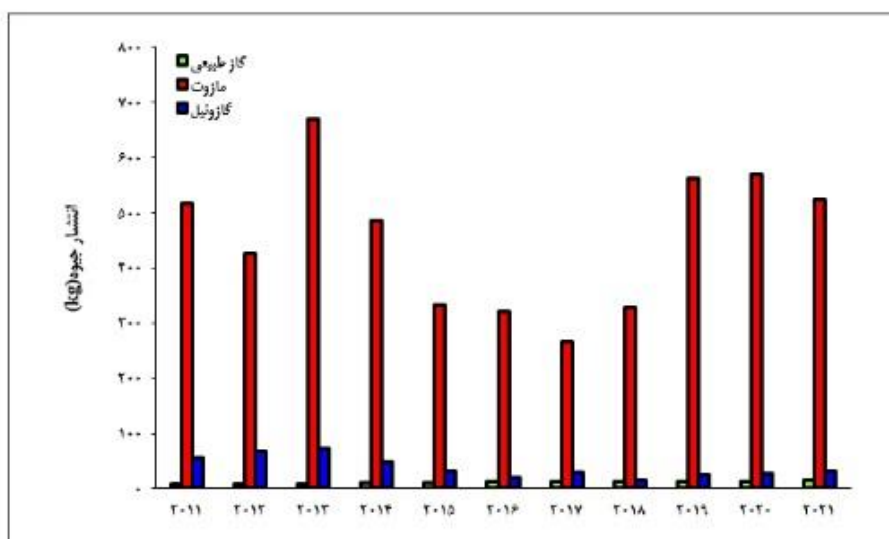
بیشترین میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی در هنگام مصرف مازوت در سال ۲۰۱۳ و کمترین میزان آن در سال ۲۰۱۷ به ترتیب $۶۶۸/۹۱$ کیلوگرم و $۲۶۵/۷۲$ کیلوگرم بوده است که نشان‌دهنده تاثیر بسیار زیاد مصرف مازوت در میزان کل انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور است. میزان میانگین انتشار جیوه به تفکیک سوخت‌های گاز طبیعی، مازوت و گازوئیل در دوره زمانی این تحقیق به ترتیب $۱۱/۳۴$ کیلوگرم، $۴۵۴/۹۳$ کیلوگرم و $۳۹/۳۴$ کیلوگرم بوده است.



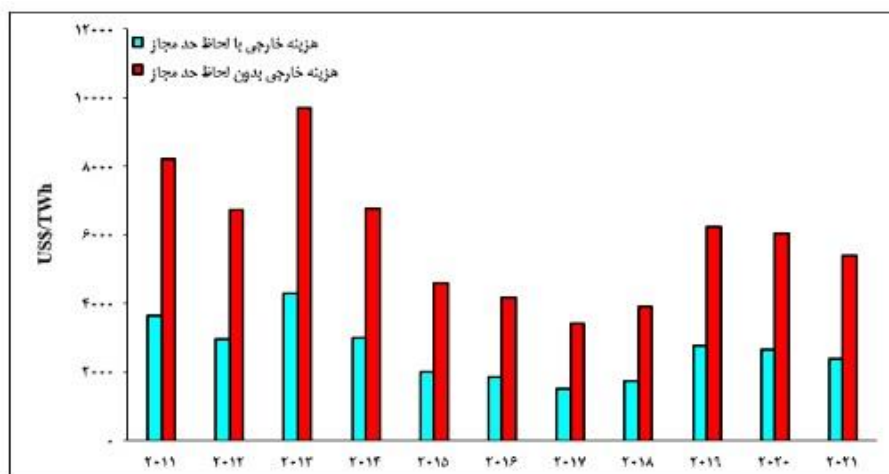
شکل ۳: میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱



شکل ۴: میانگین ضریب انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور به صورت کلی و به تفکیک سوخت‌های مصرفی در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱



شکل ۵: میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور به تفکیک سوخت مصرفی در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱



شکل ۶: میزان هزینه خارجی ناشی از انتشار جیوه در نیروگاه‌های حرارتی کشور در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱

۲-۴. تخمین هزینه خارجی ناشی از انتشار جیوه در بخش تولید برق کشور

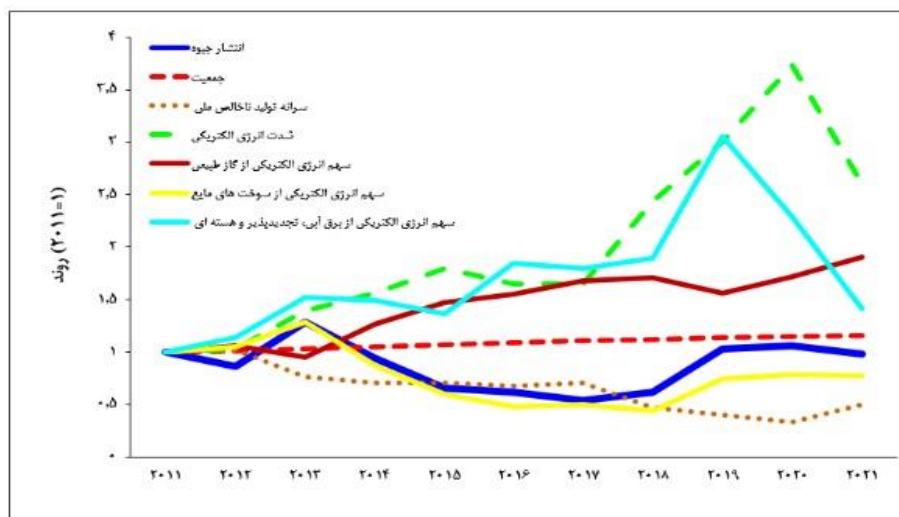
تخمین هزینه خارجی ناشی از انتشار جیوه در شکل (۶) ارائه شده است. مطابق این شکل بیشترین میزان هزینه خارجی ناشی از انتشار جیوه در سال ۲۰۱۳ در دو سناریو با لحاظ حداقل میزان مواجه و بدون لحاظ حداقل میزان مواجه به ترتیب ۴۲۸۱/۷۱ دلار بر تراوات ساعت و ۹۷۰۵/۳۵ دلار بر تراوات ساعت بوده است. همچنین کمترین میزان هزینه خارجی ناشی از انتشار جیوه در سال ۲۰۱۷ مطابق دو سناریو فوق الذکر به ترتیب ۱۵۰۹۸/۹۳ دلار بر تراوات ساعت و ۳۴۲۰/۲۵ دلار بر تراوات ساعت محاسبه شده است. میزان میانگین هزینه خارجی ناشی از انتشار جیوه به ترتیب در دو سناریو اشاره شده دوره زمانی مورد مطالعه در حدود ۲۶۱۶/۶۷ دلار بر تراوات ساعت و ۵۹۳۱/۱۱ دلار بر تراوات ساعت محاسبه گردیده است.

۳-۴. تعیین عوامل موثر بر انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور با استفاده از مدل STIRPAT

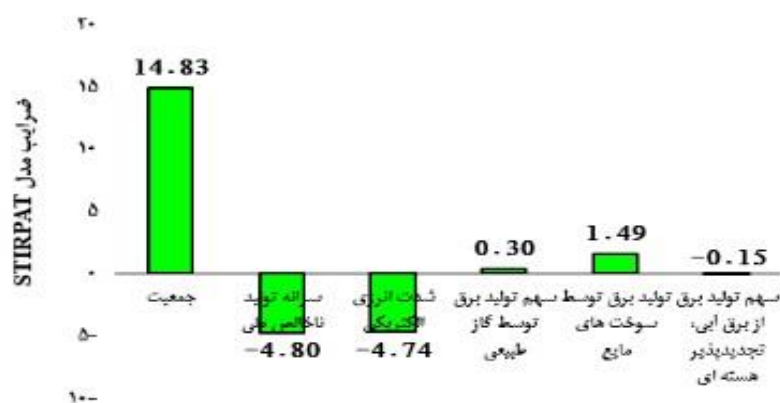
روند تغییرات عوامل موثر بر انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور مشتمل بر جمعیت، سرانه تولید ناخالص ملی، شدت تولید انرژی الکتریکی، تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف گاز طبیعی، تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف سوخت‌های مایع (مازوت و گازوئیل) و تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع غیرفسیلی نظیر برق آبی، تجدیدپذیر و هسته‌ای در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ در شکل (۷) ارائه شده است. مطابق این شکل روند تغییر انتشار جیوه در بخش تولید برق کشور تطابق بسیار مناسبی با روند تغییر تولید انرژی الکتریکی با استفاده از سوخت مایع (مازوت و گازوئیل) دارد. از طرف دیگر روند تغییر میزان انتشار جیوه در بخش تولید برق رابطه معکوس با روند تغییر تولید انرژی الکتریکی با استفاده از سوخت گاز طبیعی دارد که نشان‌دهنده اهمیت موضوع مصرف بیشتر سوخت گاز طبیعی جهت تولید برق به عنوان یکی از راهکارهای اصلی کنترل انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور است. همچنین مطابق این شکل، روند تغییرات سرانه تولید ناخالص ملی و شدت تولید انرژی الکتریکی معکوس یکدیگر هستند. مطابق شکل (۸)، در دوره زمانی مورد بررسی، عواملی مشتمل بر جمعیت، سهم تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف گاز طبیعی و تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف سوخت‌های مایع (مازوت و گازوئیل) تاثیر مثبتی بر میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور داشته و عواملی مشتمل بر میزان سرانه تولید ناخالص ملی، شدت تولید انرژی الکتریکی و سهم تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع غیرفسیلی نظیر برق آبی، تجدیدپذیر و هسته‌ای تاثیر منفی بر میزان انتشار آن داشته است. افزایش یک درصدی عواملی مشتمل بر جمعیت، سهم تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف گاز طبیعی و تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف سوخت‌های مایع (مازوت و گازوئیل) موجب افزایش به ترتیب ۱۴/۸۳، ۰/۳ و ۱/۴۹ درصدی در میزان انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور شده است. از طرف دیگر افزایش یک درصدی عواملی مشتمل بر سرانه تولید ناخالص ملی، شدت تولید انرژی الکتریکی و سهم تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع غیرفسیلی نظیر برق آبی، تجدیدپذیر و هسته‌ای موجب کاهش به ترتیب ۴/۸، ۴/۷۴ و ۰/۱۵ درصدی در میزان انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور گردیده است. همچنین مطابق شکل (۹)، در بازه زمانی این تحقیق، همبستگی بسیار خوبی ($r^2=0/971$) بین نتایج تخمین انتشار جیوه با استفاده از جعبه ابزار UNEP با نتایج پیش‌بینی میزان انتشار جیوه با استفاده از مدل STIRPAT وجود دارد.

۵. بحث

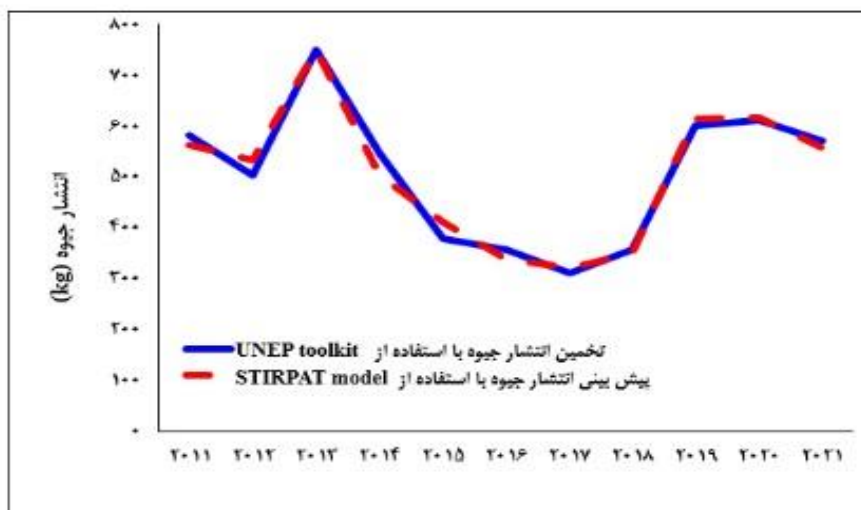
در این تحقیق در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ میزان انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور گزارش و عوامل موثر بر آن با استفاده از مدل STIRPAT مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج این پژوهش روند کلی انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور در بازه زمانی مورد مطالعه کاهشی و میزان شیب کاهش آن در حدود ۳/۵۴ کیلوگرم در سال می‌باشد. میانگین ضریب انتشار جیوه در بخش تولید برق کشور برای سوخت‌های مازوت و گازوئیل به ترتیب ۲۸۰ برابر و ۲۶ برابر این ضریب برای سوخت گاز طبیعی می‌باشد. بنابراین افزایش سهم گاز طبیعی در تولید برق کشور منجر کاهش میزان انتشار جیوه از این بخش خواهد شد. همچنین میزان میانگین انتشار جیوه و ضریب انتشار آن در بازه زمانی مورد بررسی به ترتیب ۵۰۵/۶ کیلوگرم و ۱/۸۵ کیلوگرم با ازای هر تراوات ساعت تولید برق از منابع سوخت فسیلی می‌باشد.



شکل ۷: روند تغییر عوامل موثر بر انتشار جیوه در بخش تولید برق کشور در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱



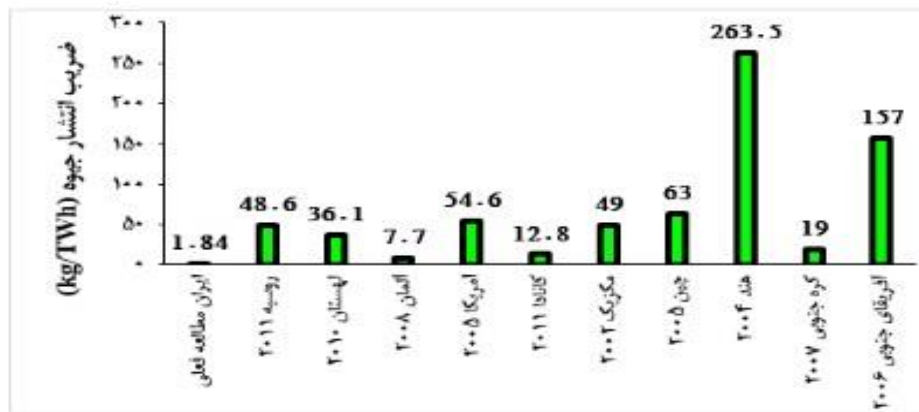
شکل ۸: ضرایب مدل STIRPAT



شکل ۹: مقایسه نتایج تخمین انتشار جیوه در بخش تولید برق با استفاده از جعبه ابزار UNEP و پیش‌بینی میزان انتشار جیوه با استفاده از مدل STIRPAT

مطابق شکل (۱۰) میزان ضریب انتشار جیوه نیروگاه‌های حرارتی کشورهای روسیه، لهستان، آلمان، آمریکا، مکزیک، چین، هند و آفریقای جنوبی (دو مطالعه مستقل) به دلیل سهم قابل توجه ذغال‌سنگ در تولید انرژی الکتریکی در کشورهای فوق‌الذکر به ترتیب ۲۶/۴۱، ۱۸/۶۲، ۱۹/۴، ۲۹/۶۷، ۹/۶۹، ۲۶/۶۳، ۳۴/۲۴، ۱۴۳/۲۱، ۱۰/۳۳ و ۸۵/۳۳ برابر (Dabrowski et al., 2008; CEC, 2023; GC, 2017;) (Glodek & Pacyna, 2009; Kim et al., 2010; Masekoameng et al., 2010; Pirrone & Mason, 2009; Romanov et al., 2012) میزان این شاخص در نیروگاه‌های حرارتی کشور است. این موضوع بیانگر کمتر بودن میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های کشور به ازای هر واحد تولید برق از منابع فسیلی در مقایسه با سایر کشورهای جهان است.

مطابق نتایج به دست آمده از مدل STIRPAT ترتیب اثر عوامل مثبت موثر بر انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور مطابق عبارت میزان جمعیت < سهم تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف سوخت‌های مایع (مازوت و گازوئیل) < سهم تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف گاز طبیعی می‌باشد. تاثیر مثبت عوامل جمعیت و سهم تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف سوخت‌های مایع به ترتیب ۴۹/۴۳ برابر و ۴/۹۶ برابر بیشتر از تاثیر سهم تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف گاز طبیعی بر میزان انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور می‌باشد. تاثیر بسیار اندک تولید انرژی الکتریکی ناشی از مصرف گاز طبیعی بر میزان انتشار جیوه با توجه به سهم میانگین قابل توجه آن در سبد سوخت‌های فسیلی مصرفی نیروگاه‌های کشور تاثیر بسیار زیادی بر میانگین ضریب انتشار جیوه در بازه زمانی این تحقیق داشته است. تاثیر قابل توجه جمعیت بر میزان انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور نشان‌دهنده تاثیر این عامل بر تقاضای مصرف برق در کشور خصوصاً در بخش‌های خانگی و کشاورزی می‌باشد. در سال ۲۰۲۱، ۱۴۳/۷۲ تراوات ساعت معادل ۴۶/۹ درصد از کل برق مصرفی کشور در این بخش‌ها مصرف شده است (TAVANIR, 2021).



شکل ۱۰: مقایسه میانگین ضریب انتشار جیوه در بخش تولید برق کشور با سایر کشورهای جهان

همچنین ترتیب اثر عوامل منفی بر انتشار جیوه از بخش تولید کشور مطابق عبارت سرانه تولید ناخالص ملی < شدت تولید انرژی الکتریکی < سهم تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع غیرفسیلی نظیر برق آبی، تجدیدپذیر و هسته‌ای می‌باشد. تاثیر منفی عوامل سرانه تولید ناخالص ملی و شدت تولید انرژی الکتریکی در حدود ۳۲ برابر بیشتر از تاثیر عامل سهم تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع غیرفسیلی نظیر برق آبی، تجدیدپذیر و هسته‌ای بر میزان انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور است. روند تولید ناخالص ملی ایران در بازه زمانی مورد مطالعه روندی کاهشی (۳۴/۱۴ بیلیون دلار در سال) داشته است که این موضوع موجب تاثیرگذاری منفی بر میزان انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور در بازه زمانی پژوهش شده است. شدت انرژی الکتریکی تولیدی تابع دو عامل میزان انرژی الکتریکی تولیدی و میزان تولید ناخالص ملی است. میزان تولید انرژی الکتریکی در ایران در دوره زمانی مورد تحقیق افزایشی (۱۱/۲۸ تراوات ساعت در سال) بوده است. بنابراین تاثیر هم زمان این دو عامل در قالب شدت انرژی الکتریکی تولیدی، منجر به تاثیرگذاری منفی این عامل بر میزان انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور در دوره زمانی مورد بررسی شده است.

۶. نتیجه گیری و پیشنهادها

نتایج این تحقیق نشان داد که انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ با شیب ۳/۵۴ کیلوگرم در سال روندی کاهشی داشته است. میانگین ضریب انتشار جیوه در بخش تولید برق کشور برای مصرف سوخت‌های مازوت و گازوئیل به ترتیب ۲۸۰ برابر و ۲۶ برابر بیشتر از میزان این ضریب برای سوخت گاز طبیعی بوده است. همچنین میانگین انتشار جیوه و ضریب انتشار آن در بازه زمانی مورد بررسی به ترتیب ۵۰۵/۶ کیلوگرم و ۱/۸۵ کیلوگرم با ازای هر تراوات ساعت تولید برق از منابع سوخت فسیلی می‌باشد. سیاستگذاری و استفاده از فناوری نوین در جهت مدیریت مصرف برق در سمت تقاضا به همراه افزایش سهم تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع غیرفسیلی نظیر برق آبی، تجدیدپذیر و هسته‌ای منجر به کاهش انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور خواهد شد. تاثیر سهم تولید انرژی الکتریکی کشور از سوخت‌های مایع (مازوت و گازوئیل) در حدود ۵ برابر بیشتر از تاثیر سهم سوخت گاز طبیعی جهت تولید برق در افزایش انتشار جیوه از بخش تولید برق کشور در بازه زمانی مورد مطالعه است. این موضوع نشان‌دهنده این است که افزایش سهم گاز طبیعی در تولید برق (بیش از ۷۶ درصد از کل سبد سوخت‌های فسیلی) یکی از راهکارهای موثر کنترل میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور است.

جهت تکمیل نتایج این پژوهش پیشنهادی به شرح ذیل ارائه می‌شود:

۱. تخمین انتشار جیوه در سایر بخش‌های مختلف اقتصادی، صنایع فرآیندی و صنایع احتراقی کشور
۲. تخمین میزان انتشار غیر مستقیم جیوه در چرخه استخراج، فرآوری و انتقال سوخت گاز طبیعی و سوخت‌های مایع به نیروگاه‌ها
۳. مدل‌سازی تاثیر واحدهای سولفورزدایی دود و فیلترهای الکترواستاتیک بر میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی
۴. مدل‌سازی پخش و پراکنش جیوه در اطراف نیروگاه‌ها به منظور ارزیابی اثرات انتشار جیوه بر سلامت انسان

۷. تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه نیرو جهت تامین مالی پروژه پژوهشی «تخمین میزان انتشار جیوه از نیروگاه‌های حرارتی کشور و ارائه فناوری‌های کنترلی مناسب» تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. منابع

- Agarwalla, H., Senapati, R. N., & Das, T. B. (2021). Mercury emissions and partitioning from Indian coal-fired power plants. *Journal of Environmental Sciences*, 100, 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.06.035>.
- Bourtsalas, A. T., & Themelis, N. J. (2019). Major sources of mercury emissions to the atmosphere: The US case. *Waste Management*, 85, 90-94. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.008>.
- Commission for Environmental Cooperation. (2023). *North American Power Plant Air Emissions*. CEC. <http://www.cec.org/sites/default/napp/en/index.php>
- Charvát, P., Klimeš, L., Pospíšil, J., Klemeš, J. J., & Varbanov, P. S. (2020). An overview of mercury emissions in the energy industry-A step to mercury footprint assessment. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122087. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122087>.
- Chen, Y., & Mu, H. (2023). Analysis of influencing factors of CO₂ emissions based on different coal dependence zones in China. *Economic Research-Ekonomika Istraživanja*, 36(2), 2177182. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2023.2177182>.
- Chekouri, S. M., Chibi, A., & Benbouziane, M. (2020). Examining the driving factors of CO₂ emissions using the STIRPAT model: the case of Algeria. *International Journal of Sustainable Energy*, 39(10), 927-940. <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1770758>.
- Chou, C. P., Chiu, C. H., Chang, T. C., & Hsi, H. C. (2021). Mercury speciation and mass distribution of coal-fired power plants in Taiwan using different air pollution control processes. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71(5), 553-563. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1860158>.
- Dabrowski, J. M., Ashton, P. J., Murray, K., Leaner, J. J., & Mason, R. P. (2008). Anthropogenic mercury emissions in South Africa: Coal combustion in power plants. *Atmospheric Environment*, 42(27), 6620-6626. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.032>.

- Environmental Protection Agency. (2023). *Health Effects of Exposures to Mercury*. EPA. <https://www.epa.gov/mercury/health-effects-exposures-mercury>.
- Environmental Protection Agency. (2023). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors*. EPA. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>.
- Fan, Y., Liu, L. C., Wu, G., & Wei, Y. M. (2006). Analyzing impact factors of CO₂ emissions using the STIRPAT model. *Environmental Impact Assessment Review*, 26(4), 377-395. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.11.007>.
- Government of Canada. (2017). *Canadian mercury science assessment: summary of key results*. GC. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/pollutants/mercury-environment/science-assessment-summary-key-results.html>
- Glodek, A., & Pacyna, J. M. (2009). Mercury emission from coal-fired power plants in Poland. *Atmospheric Environment*, 43(35), 5668-5673. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.041>.
- Huang, M. H., Chen, W. H., Trinh, M. M., & Chang, M. B. (2023). Mass flows and characteristic of mercury emitted from coal-fired power plant equipped with seawater flue gas desulphurization. *Sustainable Environment Research*, 33(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00168-9>.
- Iran Power Generation and Transmission Company (TAVANIR). (2021). *Detailed statistics of Iran's electricity industry* (In Persian). Tavanir. <https://amar.tavanir.org.ir/>
- Iran Power Generation and Transmission Company (TAVANIR). (2023). *Detailed statistics of Iran's electricity industry* (In Persian). Tavanir. <https://amar.tavanir.org.ir/>
- Kim, J. H., Park, J. M., Lee, S. B., Pudasainee, D., & Seo, Y. C. (2010). Anthropogenic mercury emission inventory with emission factors and total emission in Korea. *Atmospheric Environment*, 44(23), 2714-2721. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.037>.
- Li, B., & Wang, H. (2021). Effect of flue gas purification facilities of coal-fired power plant on mercury emission. *Energy Reports*, 7, 190-196. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.094>.
- Li, L., & Li, Y. (2023). The Spatial Relationship between CO₂ Emissions and Economic Growth in the Construction Industry: Based on the Tapio Decoupling Model and STIRPAT Model. *Sustainability*, 15(1), 528. <https://doi.org/10.3390/su15010528>.
- Liu, K., Wang, S., Wu, Q., Wang, L., Ma, Q., Zhang, L., ... & Hao, J. (2018). A highly resolved mercury emission inventory of Chinese coal-fired power plants. *Environmental science & technology*, 52(4), 2400-2408. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06209>.
- Liu, X., Wang, X., & Meng, X. (2023). Carbon Emission Scenario Prediction and Peak Path Selection in China. *Energies*, 16(5), 2276. <https://doi.org/10.3390/en16052276>.
- Lohwasser, J., & Schaffer, A. (2023). The varying roles of the dimensions of affluence in air pollution: a regional STIRPAT analysis for Germany. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 19737-19748. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23519-2>.
- MacFarlane, S., Fisher, J. A., Horowitz, H. M., & Shah, V. (2022). Two decades of changing anthropogenic mercury emissions in Australia: inventory development, trends, and atmospheric implications. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 24(9), 1474-1493. <https://doi.org/10.1039/D2EM00019A>.
- Masekoameng, K. E., Leaner, J., & Dabrowski, J. (2010). Trends in anthropogenic mercury emissions estimated for South Africa during 2000–2006. *Atmospheric Environment*, 44(25), 3007-3014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.006>.
- Minamata Convention on Mercury. (2021). *Minamata Convention on Mercury - Text and Annexes*. MCM. <https://mercuryconvention.org/en>
- Ojaghlo, M., Ugurlu, E., Kadlubek, M., & Thalassinou, E. (2023). Economic Activities and Management Issues for the Environment: An Environmental Kuznets Curve (EKC) and STIRPAT Analysis in Turkey. *Resources*, 12(5), 57. <https://doi.org/10.3390/resources12050057>.
- Pilar, L., Borovec, K., Szeliga, Z., & Górecki, J. (2021). Mercury emission from three lignite-fired power plants in the Czech Republic. *Fuel Processing Technology*, 212, 106628. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106628>.
- Pirrone, N., & Mason, R. (2009). *Mercury fate and transport in the global atmosphere*. Berlin, Springer.
- Romanov, A., Sloss, L., & Jozewicz, W. (2012). Mercury emissions from the coal-fired energy generation sector of the Russian Federation. *Energy & fuels*, 26(8), 4647-4654. <https://doi.org/10.1021/ef300398q>.
- Skånberg, K., & Svenfelt, Å. (2022). Expanding the IPAT identity to quantify backcasting sustainability scenarios. *Futures & Foresight Science*, 4(2), 116. <https://doi.org/10.1002/ffo2.116>.
- Si, M., Tarnoczi, T. J., Wiens, B. M., & Du, K. (2019). Development of predictive emissions monitoring system using open source machine learning library—keras: A case study on a cogeneration unit. *IEEE Access*, 7, 113463-113475. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930555>.
- Spadaro, J. V., & Rabl, A. (2008). Global health impacts and costs due to mercury emissions. *Risk Analysis: An*

- International Journal*, 28(3), 603-613. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01041.x>.
- Sun, X., Gingerich, D. B., Azevedo, I. L., & Mauter, M. S. (2019). Trace element mass flow rates from US coal fired power plants. *Environmental science & technology*, 53(10), 5585-5595. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01039>.
- Thepanondh, S., & Tunlathorntham, V. (2020). Appropriate scenarios for mercury emission control from coal-fired power plant in Thailand: emissions and ambient concentrations analysis. *Heliyon*, 6(6), e04197. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04197>.
- Thao, P. T. B., Pimonsree, S., Suppoung, K., Bonnet, S., Junpen, A., & Garivait, S. (2021). Development of an anthropogenic atmospheric mercury emissions inventory in Thailand in 2018. *Atmospheric Pollution Research*, 12(9), 101170. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101170>.
- Thio, E., Tan, M., Li, L., Salman, M., Long, X., Sun, H., & Zhu, B. (2021). The estimation of influencing factors for carbon emissions based on EKC hypothesis and STIRPAT model: Evidence from top 10 countries. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 11226–11259. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01905-z>.
- United Nations Environment Programme. (2023). *Mercury Inventory Toolkit*. UNEP. <https://www.unep.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/mercury/mercury-inventory-toolkit>
- Wei, Z., Wei, K., & Liu, J. (2023). Decoupling relationship between carbon emissions and economic development and prediction of carbon emissions in Henan Province: based on Tapio method and STIRPAT model. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), 52679-52691. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26051-z>.
- World Bank. (2023). *The World Bank Data*. WB. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>
- Wu, Q., Wang, S., Liu, K., Li, G., & Hao, J. (2018). Emission-limit-oriented strategy to control atmospheric mercury emissions in coal-fired power plants toward the implementation of the Minamata Convention. *Environmental science & technology*, 52(19), 11087-11093.
- Wu, Z., Ye, H., Shan, Y., Chen, B., & Li, J. (2020). A city-level inventory for atmospheric mercury emissions from coal combustion in China. *Atmospheric environment*, 223, 117245. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117245>.
- Xu, Y., Zhang, W., Wang, J., Ji, S., Wang, C., & Streets, D. G. (2021). Investigating the spatially heterogeneous impacts of urbanization on city-level industrial SO₂ emissions: Evidence from night-time light data in China. *Ecological Indicators*, 133, 108430. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108430>.
- Yu, S., Zhang, Q., Hao, J. L., Ma, W., Sun, Y., Wang, X., & Song, Y. (2023). Development of an extended STIRPAT model to assess the driving factors of household carbon dioxide emissions in China. *Journal of Environmental Management*, 325, 116502. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116502>.
- Zhang, Y., Song, Z., Huang, S., Zhang, P., Peng, Y., Wu, P., ... & Li, P. (2021). Global health effects of future atmospheric mercury emissions. *Nature Communications*, 12(1), 3035. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23391-7>