



University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies

Vol. 51, No. 2, Summer 2025

Print ISSN: 1025-8620

Online ISSN 2345-6922

Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Optimal Carbon Pricing Considering Human Health Benefits from the Reduction in Air Pollutant Emissions in Urban Energy Systems

Ali Akbar Rezazadeh¹ , Akram Avami^{2✉}

1. Department of Energy Engineering, Faculty of Energy Systems Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: aliakbar.rezazadeh@sharif.edu
2. Corresponding author, Department of Energy Engineering, Faculty of Energy Systems Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: avami@sharif.edu

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Objective: Carbon pricing is a critical tool for achieving environmental objectives while maintaining economic equilibrium, yet determining an optimal carbon price remains a complex challenge. Carbon pricing not only influences the optimal conditions and the technological composition of the energy system but also leads to new emission patterns. The energy system has a lot of external costs, including social, health, ecosystem damage, and resource depletion. It is essential to set taxes in a way that minimizes market disruptions while internalizing externalities. Greenhouse gas (GHG) emissions Penalty (GP) cannot only reduce health costs due to global warming but also, through a co-benefit approach, reduce health costs associated with air pollution. Thus, this study estimates the level of GP with the aim of internalizing the human health costs of global warming and air pollution. The structure of the energy system significantly affects carbon emissions and pricing, necessitating an integrated modeling approach.
Article history: Received: 20 May 2025 Received in revised form: 29 August 2025 Accepted: 2 September 2025 Available online: 20 September 2025	Method: This study developed a novel bi-level integrated assessment model of emission-health-energy, where the lower level optimizes the energy system and the upper level optimizes the carbon price. The Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios depict the socioeconomic status, while the Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios represent the climatic conditions. Based on the RCP scenarios, General Circulation Models (GCMs) are applied to determine the climate condition. A data-driven Regional Climate Model (RCM) is developed to estimate climate conditions in the study area. At the upper level, the objective function seeks to minimize the GP annually. In the GP approach, the price should compensate for the health costs stemming from climate change and air pollution. This approach emphasizes that GP has the capacity to offset the damages caused by air pollution, effectively demonstrating a co-benefit between carbon emissions and air pollution in policy-making. In this approach, the discounted GHG emission penalty in each year is equal to discounted health costs. In the first step, the more complex lower-level model was developed. After running the integrated energy-health-emission model at the lower level, the outputs were compared to verify whether the discounted health costs match the discounted GHG emission penalty. If this condition was not satisfied, the GP would be adjusted; otherwise, the optimal pathway for the energy supply chain and the optimal GP were determined.
Keywords: <i>Bi- level optimization, Co- benefit, Externality, GHG emission penalty, Integrated assessment model.</i>	Results: This model was applied to four scenarios within a case study. The model revealed carbon prices ranging from \$3.3 to \$7.9 per tCO ₂ eq, varying across years and scenarios. The results demonstrated the importance of considering economic benefits in carbon pricing, highlighting significant differences compared to previous studies. Conclusions: The proposed model provides a robust tool for policymakers to align carbon pricing with environmental and climate policy while maintaining economic stability. By linking energy system optimization, health cost internalization, and climate policy, this framework designs efficient carbon policies. Future research could expand its applicability to other regions and externalities, further refining the balance between sustainability and economic growth.

Cite this article: Rezazadeh, A. A. and Avami, A. (2025). Optimal Carbon Pricing Considering Human Health Benefits from the Reduction in Air Pollutant Emissions in Urban Energy Systems. *Journal of Environmental Studies*, 51 (2), 231- 253. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.395024.1008607>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.395024.1008607>

Introduction

Environmental analysis is a key component of energy system studies (Afsari Mamaghani et al., 2023). Air pollution and climate change are not only major environmental issues but also one of the most significant challenges to human society (A. A. Rezazadeh, Avami, et al., 2022). Research suggests a significant link between these two challenges (Alizadeh, Rezazadeh, et al., 2023). Emission control strategies can be categorized into behavior control (Erfan Doraki et al., 2024), level control (DOE(Iran), 2015), and variable control (Xu et al., 2023). Behavior control mechanisms use regulations or incentives to influence behavior, while level control focuses on limiting direct or indirect emissions. Variable control includes price, quantity, and technology-based approaches. Quantity-based policies maintain a fixed level of environmental damage while allowing price fluctuations, whereas price-based policies stabilize control costs while permitting adjustments in pollution levels. Technical solutions, on the other hand, rely on technological interventions to mitigate environmental damages (Rezazadeh et al., 2022).

Regulatory approaches, such as ambient air quality standards, process standards, industrial emissions standards, and fuel quality standards, use state authority to reduce emissions (Rezazadeh et al., 2022). However, these methods have several limitations (Bhattacharyya, 2011). Economic tools, such as financial penalty (e.g., taxes) (Shahbazi et al., 2024), financial aids (e.g., subsidies) (Shen et al., 2021), and market mechanisms (e.g., cap and trade) (Bhattacharyya, 2011), offer alternative solutions. One such tool is the Greenhouse Gas (GHG) emissions Penalty (GP), which can reduce GHG emissions by 90% (Lin & Li, 2011). GP increases the cost of using high-emission technologies and is sometimes determined based on health impacts (Shahbazi et al., 2024). However, challenges such as determining the optimal GP rate, addressing international trade implications, and mitigating inequality remain (Fremstad & Paul, 2019).

Externalities create a divergence between private and social costs, with market equilibrium reflecting only private costs and ignoring social costs. Internalizing these externalities is essential to correct this inefficiency (Bhattacharyya, 2011). There are two common approaches for internalizing externalities, namely Pigouvian taxes and quantity limitations (Manta et al., 2023). Pigouvian taxes aim to align private and social costs by taxing activities causing negative externalities at a rate equal to the marginal external cost. On the other hand, quantity limitations involve restricting production levels (Bhattacharyya, 2011). While both methods achieve the same results, they have different effects. Pigouvian taxes generate revenue for the government, while limitations on quantity lead to increased prices (Bhattacharyya, 2011). Considering that tax revenue goes to the government, this income can be allocated to reduce environmental impacts or adaptation mechanisms.

The cost per ton of GHG emissions varies across different studies. Carleton et al. (2021) estimated this cost to be \$36.6 (with a range of \$73 to \$7.8 decrease) if moving towards RCP8.5, and \$17.1 (with a range of \$53.6 to \$24.7 decrease) if moving towards RCP4.5 (Carleton et al., 2021). Results from West et al. (2013) indicate the cost of GHG emissions to be between \$50 and \$300 per ton (West et al., 2013). Additionally, Nemet, Holloway, and Meier (2010) found that the cost per ton of GHG emissions ranges from \$2 to \$196, with an average of \$49 per ton (Nemet et al., 2010). Moreover, Ricke et al. (2018) demonstrated that the social cost of GHG varies across different regions. Some regions may benefit by around \$10 per ton of emissions, while others may incur damages of up to \$50 per additional ton emitted (Ricke et al., 2018).

These approaches do not consider co-benefits between climate change, economy, and health, and do not consider the effects of change in the energy supply chain. Consequently, the GP amount is often set higher than what is necessary to reduce emissions.

In this paper, we proposed an integrated approach to carbon pricing by developing a bi-level optimization model that integrated energy supply chain, health, and emissions. Our results demonstrated that the optimal GP varies across different scenarios and years (from 3.3 to 7.9 \$/tCO₂eq), providing a balanced solution to reduce emissions while minimizing economic pressure. It is important to note that the results of this study demonstrated that the carbon price could be lower than the social cost of carbon while still achieving environmental goals and emission reduction targets. The key aspects of this work included (1) a bi-level optimization model that incorporated energy transitions for determining GP, (2) consideration of health co-benefits in carbon pricing, and (3) modeling the impact of GP on the energy supply chain. This approach provides policymakers with a structured framework to balance environmental and health objectives while maintaining economic stability.

Method

In this study, an integrated assessment model of emission-health-energy was developed. This bi-level model also estimated the GP for study years and different scenarios. Global socio-economic conditions were considered. A data-driven Regional Climate Model (RCM) was developed to estimate climate conditions in the study area (Rezazadeh et al., 2024). Transportation demand was estimated from an agent-based model that considered behavior (Erfan Doraki et al., 2024). Domestic energy demand was derived through a study employing data-driven models (Rezazadeh et al., 2024). Also, industrial energy demand was extracted from a study utilizing energy intensity (Rezazadeh et al., 2025; Rezazadeh & Avami, 2024). These data were fed into the Integrated Emission-Health-Energy Model (IEAEM). IEAEM

was composed of several sets of equations. The first set consisted of flow balance equations, while the second set included capacity adequacy equations. In addition, the model incorporated equations for emission assessment, health impact assessment, and economic assessment. In the bi-level model, the lower level optimized the energy system using IEHEM, while the upper level iteratively adjusted the GP until Discounted GHG Penalty (DGP) equaled the Discounted Health Cost (DHC). This equilibrium ensured that the carbon price reflected true health costs while maintaining system efficiency, demonstrating how carbon pricing could simultaneously address climate and air pollution impacts through a co-benefits approach.

Results

The case study of this research was Tehran, the capital of Iran. This study modeled the energy system from primary energy sources to useful energy, incorporating a wide range of technologies (see Rezazadeh & Avami, 2024 for details). Four scenarios were developed to account for various possible future conditions. The Cheetah (SSP1-2.6) scenario targeted net-zero emissions. The Caracal (SSP2-4.5) scenario aimed for emissions reduction but did not target net-zero emissions. The Bear (SSP3-7.0) scenario prioritized the maximum economic growth, while the Hyena (SSP5-8.5) scenario imposed no constraints and focused on minimizing costs.

The GP in the Cheetah scenario was higher than in the other scenarios. However, from 2040, the GP in the Bear scenario was greater than the Cheetah scenario. The lowest GP was assigned to the Hyena scenario. In 2025, the highest carbon price was observed in the Cheetah scenario, set at \$4.16 per ton. This rate was comparable to the Tokyo emissions trading program, which stood at approximately \$4.01 in the same year. Other scenarios showed prices ranging between \$3.28 and \$3.71. For example, the Hyena scenario, with the lowest price at \$3.28, reflected a level similar to Mexico at \$3.94 and Japan at \$1.92. By 2030, carbon prices were estimated to increase in all scenarios. In the Cheetah scenario, the price rose to \$4.61, comparable to the Fujian, China emissions trading program, which recorded around \$4.72 in 2025. The Bear scenario in the same year showed a price of \$4.26, slightly surpassing the Tokyo market rate. By 2050, the final year of the modeling period, the gap between scenarios became more pronounced. The Bear scenario reached the highest price at \$7.89 per ton, which was higher than Colombia's \$6.54 but lower than Massachusetts' \$9.30 (World Bank, 2025).

The GP determined by this method was significantly lower than in other studies. This indicated that the GP specified in previous studies was higher than necessary for emission reduction. Selecting an excessively high GP in previous studies made its implementation impractical and unfeasible. Therefore, it was strongly recommended to utilize the method proposed in this article for determining the GP.

It is important to note that higher GP wouldn't necessarily lead to emissions reduction. For instance, in the Bear scenario, GP in 2040 was more than in the Cheetah scenario, but the emission was higher too. The proposed GP aligned very well with the marginal abatement cost curves in the study by Rezazadeh and Avami, indicating excellent coordination (Rezazadeh & Avami, 2024). The trend of Total GHG Emission (TGE) illustrated that emission reduction sharply decreased in the early years, resulting in a significant decline from 537.49 million tons of CO₂eq emissions to much lower levels, attributed to system changes in all scenarios. Following the emission reduction in the early years across all scenarios, an increase in emissions in the Bear scenario stood out. However, the reduction trend in the Caracal scenario was even steeper than the Cheetah scenario, except in 2050 when the net-zero emission target constraint was activated.

Despite the increase in the emission penalties, the total emission penalty accumulated in different years follows a declining trend. This decrease was almost consistent across all the scenarios, but the overall amount was higher in the Bear scenario compared to the other scenarios. A significant economic investment was required in 2025 for fundamental changes in the energy system. This foundational investment would reduce costs in subsequent years. Moreover, the Cheetah scenario, due to its net-zero emission target in 2050, required more investment. The funding for this investment should have been sourced through a developed country. The health impact in the Caracal scenario was declining at a steeper rate compared to other scenarios (except in 2050 for the Cheetah scenario). This trend suggested that health effects may not decrease even with the implementation of higher GP, as in the Bear scenario. Therefore, behavioral changes, which were prominently featured in the Caracal scenario, appeared to be the most effective actions. Taking into account the optimal GP, the choice for selected technologies would be made in different scenarios. For buses, two technologies, natural gas fuel bus and electric bus, were the primary options in the model. The natural gas fuel buses had a greater share except in the Hyena scenario, where electric buses were allocated a larger share. This was understandable given the lower price of electricity in this scenario. For cars, the most critical model choice was CNG fuel, and the same applies to taxis as well. Additionally, the model choice for motorcycle was electric motorcycle in all scenarios.

In all scenarios, 64.95% of cooling was provided by evaporative coolers and 9% by fans. The remaining share was distributed among air conditioners by inverter, air conditioners with no-inverter, and absorption chillers. For cooking, natural gas stove was utilized in all scenarios except for the Hyena scenario, where residual capacity of electric stove

was used because of the lower electricity price. In the Cheetah, Caracal, and Bear scenarios, heat was provided by package heaters at 90.03%, 100%, and 50.82%, respectively. However, in the Hyena scenario, 76.07% of heating was supplied by an electric heater. The most important technology for hot water supply had been identified as the natural gas water heater.

The model choice for processed waste was landfill in all scenarios except for the Cheetah scenario, where a municipal solid waste incinerator was utilized to achieve a net zero emission target. Heat for industry supply was predominantly facilitated by natural gas in all scenarios.

Conclusions

Many researchers and policymakers emphasize that reducing GHG emissions is essential for the energy supply chain. There are numerous approaches to reduce GHGs, one of which is GP. To determine an optimal GP, an integrated emission-health-energy nexus model was developed in this study. This bi-level model determined the optimal amount of GP while the health costs were compensated, and at the same time it kept GP at its minimum level so that the market balance was not disturbed. GPs ranging from \$3.28 to \$7.89 per ton were estimated across different years and scenarios. These taxes can offset health costs due to global warming and air pollution, yet some social costs may remain. It's noteworthy that the trend of GP is upward. It is suggested that such a framework be employed in future studies for determining GP. It is recommended to consider resource availability and ecosystem quality in future studies.

Author Contributions

Ali Akbar Rezazadeh: Development of the conceptual model, conducting modeling and data collection, performing calculations, statistical data analysis, interpretation of data and results, and drafting the manuscript.

Akram Avami: Research design, supervision of research stages, data collection, review and verification of results, and revision, editing, and finalization of the manuscript.

Data Availability Statement

The datasets generated and/or analyzed during the current study are not publicly available. However, some of them are available from the corresponding author on reasonable request and under the permission of authorities.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Iran National Science Foundation (INSF) [Grant Number 4014105] and Sharif University of Technology (SUT) for this research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

The authors gratefully acknowledge the financial support given by the Iran National Science Foundation (INSF) [grant number 4014105]

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



University of Tehran Press

نشریه محیط شناسی

دوره ۵۱، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

Homepage: <http://Jes.ut.ac.ir>

شاپای چاپی: ۸۶۲۰-۱۰۲۵
شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲-۲۳۴۵

تعیین بهینه قیمت کربن با در نظر گرفتن منافع سلامت انسان ناشی از کاهش انتشار آلاینده‌های هوای سیستم انرژی شهری

علی اکبر رضازاده^۱، اکرم عوامی^۲

۱. گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه شریف، تهران، ایران. رایانامه: aliakbar.rezazadeh@sharif.edu
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه شریف، تهران، ایران. رایانامه: avami@sharif.edu

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

مقاله پژوهشی

هدف: یکی از روش‌ها کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تعیین قیمت کربن است. این قیمت‌گذاری نه تنها شرایط بهینه سیستم انرژی و ترکیب فناوری‌های آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه به الگوهای جدید انتشار آلاینده‌ها نیز منجر می‌شود. از سوی دیگر، ساختار سیستم انرژی تأثیر قابل توجهی بر قیمت مناسب کربن دارد، لذا استفاده از یک مدل‌سازی یکپارچه در این زمینه ضروری است.

روش پژوهشی: در این مطالعه، یک مدل یکپارچه انتشار-سلامت-انرژی دوسطحی برای تعیین بهینه قیمت کربن توسعه داده شده است. در این مدل حداقل قیمت کربن تعیین می‌گردد به شرط آن که مدل یکپارچه نیز در شرایط بهینه قرار داشته باشد. این مدل به کمک یک الگوریتم تکراری قیمت بهینه کربن را در سال‌ها و سناریوهای مختلف ارائه می‌دهد. مدل یکپارچه به صورت نرم با مدل‌های تدوین سناریوها، مدل‌ریز مقیاس‌نمایی، مدل تقاضای حمل‌ونقل و تقاضای انرژی یکپارچه شده است و به صورت سخت با مدل‌های عرضه انرژی، انتشار و سلامتی یکپارچه شده است.

یافته‌ها: با اعمال این مدل در چهار سناریوی مختلف در تهران، قیمت‌های کربن بین ۳ تا ۸ دلار به ازای هر تن معادل دی‌اکسید کربن محاسبه شد که بسته به سال و سناریو متفاوت است. این در حالی است که با این قیمت حداقلی اهداف محیط‌زیستی هر سناریو شامل کاهش انتشار و خالص انتشار صفر اجرا می‌گردد و در عین حال حداقل تغییر در تعادل بازار را ایجاد می‌کند. این موضوع با توجه به این که در این مطالعه همسودی تغییر اقلیم و اقتصاد در مدل یکپارچه ارزیابی شده است قابل درک است زیرا پتانسیل‌های سودآوری کاهش انتشار زیادی در این محدوده وجود دارد.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان می‌دهد که کاهش انتشار و حتی دستیابی به هدف خالص انتشار صفر در سیستم انرژی امکان‌پذیر است. برای دستیابی به این موضوع می‌توان از اعمال قیمت کربن استفاده کرد. بنابراین نیاز به قیمت‌گذاری بهینه کربن است تا بهینه‌سازی منافع زیست‌محیطی، سلامت، و اقتصادی به صورت هم‌زمان صورت بگیرد. به این منظور می‌توان از مدل‌های ارزیابی یکپارچه استفاده کرد. این مطالعه نشان داد که قیمت‌گذاری کربن با این روش نه تنها می‌تواند اهداف محیط‌زیستی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را میسر نماید بلکه امکان داخلی‌سازی هزینه‌های سلامتی ناشی از آلودگی هوا و تغییر اقلیم را هم دارد. نتایج و روش این پژوهش رویکردی مناسب به تصمیم‌گیران و محققان این حوزه می‌دهد. از طرفی استفاده از این روش در سایر مطالعات و همچنین درونی کردن سایر هزینه‌های خارجی با این روش پیشنهاد می‌گردد.

کلیدواژه‌ها:

جریمه انتشار گازهای گلخانه‌ای،
مدلسازی ارزیابی یکپارچه،
مدلسازی دوسطحی،
هزینه خارجی،
همسودی.

استناد: رضازاده، علی اکبر و عوامی، اکرم. (۱۴۰۴). تعیین بهینه قیمت کربن با در نظر گرفتن منافع سلامت انسان ناشی از کاهش انتشار آلاینده‌های هوای

سیستم انرژی شهری. نشریه محیط‌شناسی، ۵۱(۲)، ۲۳۱-۲۵۳. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.395024.1008607>

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.395024.1008607>

مقدمه

حدود ۸۲/۱ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان مربوط به بخش انرژی است (Watch, 2022). بنابراین به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اجرای سیاست‌هایی در بخش انرژی الزامی است. راهبردهای کنترل انتشار را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: کنترل رفتاری (Erfan Doraki et al., 2024)، کنترل سطحی (DOE Iran, 2015)، و کنترل متغیرها (Xu et al., 2023). کنترل رفتاری از طریق قوانین یا مشوق‌ها به منظور تغییر رفتار صورت می‌گیرد. در کنترل سطح انتشار، میزان انتشار مستقیم یا غیرمستقیم تعیین می‌شود. در کنترل متغیرها، عواملی چون قیمت، مقدار و فناوری نقش دارند. سیاست‌های مبتنی بر مقدار، سطح ثابت از آسیب زیست‌محیطی را حفظ می‌کنند و اجازه می‌دهند قیمت نوسان داشته باشد، در حالی که سیاست‌های مبتنی بر قیمت، هزینه کنترل را ثابت نگه می‌دارند و به انتشار اجازه نوسان می‌دهند. راهکارهای فنی نیز تمرکز بر مداخلات فناورانه جهت کاهش آسیب دارند (Bhattacharyya, 2011).

رویکرد تنظیم‌گری مثل استاندارد کیفیت هوا، استانداردهای فناوری، استاندارد انتشار صنایع و استاندارد کیفیت سوخت از قدرت دولت برای کاهش انتشار آلاینده‌ها استفاده می‌کنند (Bhattacharyya, 2011)، البته این روش‌ها دارای محدودیت‌های متعددی هستند (Bhattacharyya, 2011). ابزارهای اقتصادی مثل جریمه مالی (Shahbazi et al., 2024)، کمک‌های مالی (Shen et al., 2021)، و مکانیسم‌های بازار (مثل بازار کربن) (Bhattacharyya, 2011) راه حل‌های جایگزین را ارائه می‌دهند. مطالعات نشان داده است که جریمه انتشار می‌تواند انتشار را تا ۹۰ درصد کاهش دهد (Lin & Li, 2011). جریمه انتشار، هزینه استفاده از فناوری‌های آلوده را افزایش می‌دهد و معمولاً بر اساس هزینه سلامتی یا اجتماعی انتشار آلاینده تخمین زده می‌شود (Shahbazi et al., 2024). اما مواردی مثل تعیین نرخ مناسب جریمه انتشار، افزایش نابرابری و اثر بر روی تجارت جهانی از جمله چالش‌های این روش است (Fremstad & Paul, 2019).

هزینه‌های خارجی باعث ایجاد یک اختلاف بین هزینه‌های شخصی و اجتماعی می‌شود، این در حالی است که تعادل بازار تنها به هزینه‌های خصوصی توجه دارد و هزینه‌های اجتماعی را در نظر نمی‌گیرد (Bhattacharyya, 2011). برای درونی‌سازی هزینه‌های خارجی دو رویکرد وجود دارد که عبارتند از تعیین مالیات و تعیین حد مجاز (Manta et al., 2023). با وضع مالیات بر فعالیت‌های آلاینده، سعی می‌شود هزینه‌های خصوصی با هزینه‌های اجتماعی هم‌راستا شوند. در مقابل، محدودسازی مقداری، تولید را در حدی خاص محدود می‌سازد. اگر چه هر دو روش به نتیجه مشابهی می‌رسند، اما اثر متفاوتی خواهند داشت. مالیات باعث ایجاد درآمد برای دولت می‌شود که می‌توان این درآمد را برای کاهش انتشار و یا سازگاری مورد استفاده قرار داد (Bhattacharyya, 2011). برای تعیین قیمت کربن روش‌هایی مثل تخمین هزینه سلامتی یا اجتماعی (Carleton et al., 2021) و یا استفاده از هزینه نهایی کاهش انتشار (Salgas et al., 2025) مورد استفاده قرار گرفته است. اما این روش‌ها حداقل قیمت را با توجه به تغییرات ممکن در زنجیره تامین در نظر نمی‌گیرند. می‌توان با توسعه یک مدل دو سطحی^۱ ارزیابی یکپارچه انرژی-انتشار-سلامتی علاوه بر تعیین حداقل قیمت کربن ساختار بهینه سیستم انرژی تحت تاثیر آن را نیز بررسی نمود. در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی توسعه داده شده است که در یک سطح سیستم انرژی را با در نظر گرفتن هزینه آسیب به سلامتی انسان ناشی از انتشار آلاینده‌ها به هوا مدل‌سازی و بهینه‌سازی می‌نماید و در سطح دیگر قیمت بهینه کربن را به نحوی تعیین می‌کند که هزینه‌های آسیب به سلامتی انسان ناشی از آلودگی هوا درونی‌سازی و جبران شود. رویکرد این مطالعه در واقع یافتن حداقل قیمت کربنی است که باعث دستیابی به اهداف محیط‌زیستی می‌شود. این مدل برای تعیین بهینه قیمت کربن برای شهرهای بزرگ توسعه داده شده است. نوآوری‌های این مطالعه عبارتند از:

الف) توسعه یک مدل ارزیابی یکپارچه دوسطحی به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم انرژی با رویکرد همسودی و تعیین قیمت بهینه برای انتشار گازهای گلخانه‌ای،

ب) در نظر گرفتن همسودی سلامتی در تعیین قیمت کربن،

ج) در نظر گرفتن اثر قیمت کربن بر روی سیستم انرژی و سلامتی ناشی از آلودگی هوا.

شکل ۱ ارتباط انرژی-انتشار-سلامتی را با مالیات کربن نشان می‌دهد. در حالی که تقاضای انرژی وابسته به تغییر اقلیم (دما) است، عرضه انرژی وابسته به مالیات کربن است. سیستم انرژی باعث انتشار آلاینده‌های هوا می‌شود که به ترتیب باعث تغییر اقلیم و آلودگی هوا می‌شوند که در نتیجه آن اثر سلامتی رخ می‌دهد. مالیات کربن نیز تابعی از اثر سلامتی و انتشار گازهای گلخانه‌ای است.



شکل ۱. ارتباط انرژی-انتشار-سلامت با مالیات کربن در این مطالعه (منبع: نگارندگان).

پیشینه پژوهش

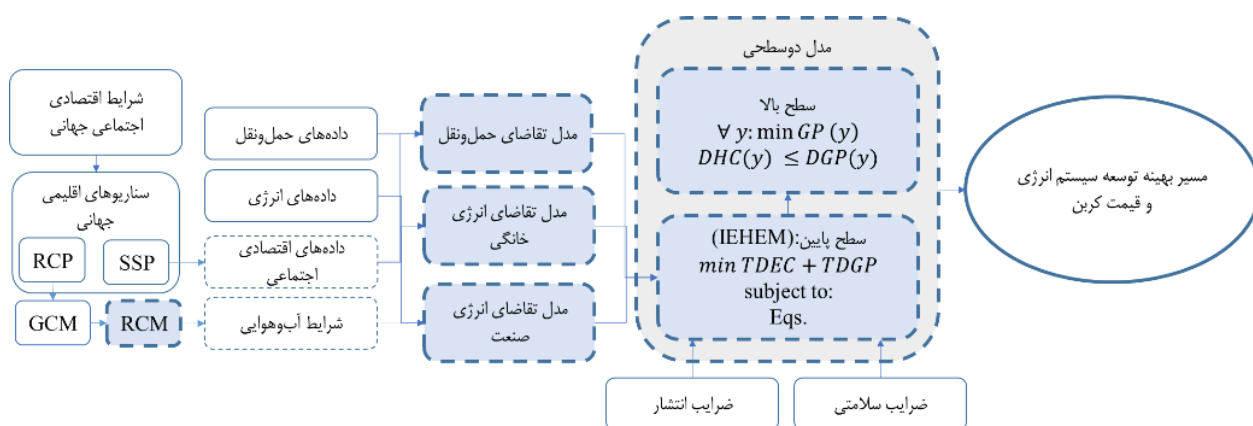
قیمت کربن در مطالعات مختلف بررسی شده است. کارلتون و همکاران (۲۰۲۱) هزینه هر تن انتشار گازهای گلخانه‌ای را در سناریوی RCP8.5 ۳۷ دلار بر تن (۸ تا ۷۳ دلار بر تن) و در سناریوی RCP4.5 ۱۷ دلار بر تن (۲۵-۵۴ دلار بر تن) تخمین زده‌اند (Carleton et al., 2021). این در حالی است که مطالعه وست و همکاران (۲۰۱۳) قیمت هر تن انتشار گازهای گلخانه‌ای را بین ۵۰ تا ۳۰۰ دلار بر تن تخمین زده‌اند (West et al., 2013). در مطالعه نمت و همکاران (۲۰۱۰) قیمت کربن ۴۹ دلار بر تن (۲ تا ۱۹۶ دلار بر تن) برآورد شده است (Nemet et al., 2010). مطالعات به خوبی نشان داده‌اند که هزینه ناشی از انتشار هر تن گازهای گلخانه‌ای تابعی از منطقه جغرافیایی نیز هست به طوری که برخی نقاط ۱۰ دلار بر تن مزیت به‌دست می‌آورند و برخی نقاط دیگر به ازای هر تن انتشار بیشتر، ۵۰ دلار آسیب بیشتر می‌بینند (Ricke et al., 2018). این پژوهش‌ها با توجه به آثار سلامتی و اجتماعی ناشی از تغییر اقلیم این هزینه‌ها را برآورد کرده‌اند و در واقع اثر اعمال سیاست بر روی سیستم دیده نشده است. در مطالعه مصرزاده و همکاران (۲۰۲۳) قیمت کربن به کمک یک مدل دوسطحی ارزیابی شده است. البته مدل مورد استفاده در این مطالعه در سطح بالا فاقد بهینه‌سازی است و تنها مدل سطح پایین به صورت تکرارشونده اجرا می‌شود تا مقدار مناسب برای رسیدن به مقداری مشخص از کاهش انتشار به‌دست بیاید (Mesrzade et al., 2023). شیینگ و همکاران (۲۰۲۵) یک مدل دوسطحی توسعه دادند که در سطح بالا قیمت کربن و در سطح پایین سیستم انرژی بهینه می‌شود. آن‌ها این مدل را با توجه به مفهوم دوگانگی به یک مدل یک سطحی تبدیل کردند این مطالعه فاقد تنوع در فناوری‌ها و سناریوهای است (Xiong et al., 2025). شهبازی و همکاران (۲۰۲۴) نیز برای تعیین قیمت کربن از یک مدل دوسطحی استفاده کردند که به کمک یک الگوریتم بازگشتی قابل حل است. در این مطالعه تنها به سیستم تولید برق توجه دارد (Shahbazi et al., 2024). مطالعات پیشین علاوه بر تمرکز بر بخش خاصی از سیستم انرژی به مسئله همسودی تغییر اقلیم، اقتصاد و سلامتی انسان ناشی از آلودگی هوا توجه نکرده‌اند و همچنین اثر قیمت کربن بر روی سیستم انرژی در نظر گرفته نشده است. بنابراین در برخی موارد قیمت کربن بیش از اندازه بزرگ انتخاب شده است. زیرا با در نظر گرفتن مسئله همسودی بسیاری از راه‌حل‌های کاهش انتشار که سودمند هستند انتخاب خواهند شد. در این مطالعه، همسودی (co-benefit) به معنای منافع هم‌زمانی است که از کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (برای مقابله با تغییر اقلیم) به دست می‌آید و در عین حال، باعث بهبود وضعیت اقتصادی و کاهش اثرات منفی آلودگی هوا بر سلامت انسان می‌شود. به عبارت دیگر، اقدام برای کاهش کربن نه تنها تغییر اقلیم را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند هم‌زمان به نفع سلامت عمومی و اقتصاد نیز باشد.

روش‌شناسی پژوهش

مالیات‌های محیط‌زیستی و اجتماعی برای داخلی‌سازی هزینه‌های خارجی طراحی شده‌اند. سیستم انرژی ممکن است متحمل هزینه‌های

خارجی مختلفی از جمله آسیب‌های اجتماعی، بهداشتی، اکوسیستمی و کاهش منابع شود. تعیین مالیات باید ضمن جبران هزینه‌های خارجی، انحراف از تعادل بازار را به حداقل برساند. مالیات کربن نه تنها این توانایی را دارد که هزینه‌های بهداشتی ناشی از گرم شدن کره زمین را جبران کند، بلکه با رویکرد همسودی، هزینه‌های سلامتی ناشی از آلودگی هوا را نیز جبران می‌کند. بنابراین، سطح مالیات کربن در این مطالعه با هدف داخلی‌سازی هزینه سلامتی ناشی از گرمایش جهانی و آلودگی هوا برآورد می‌شود. بنابراین هدف مدل، یافتن حداقل سطحی از قیمت کربن است که منجر به دستیابی به اهداف زیست‌محیطی و سلامت بدون تحمیل هزینه بیش از حد بر اقتصاد شود.

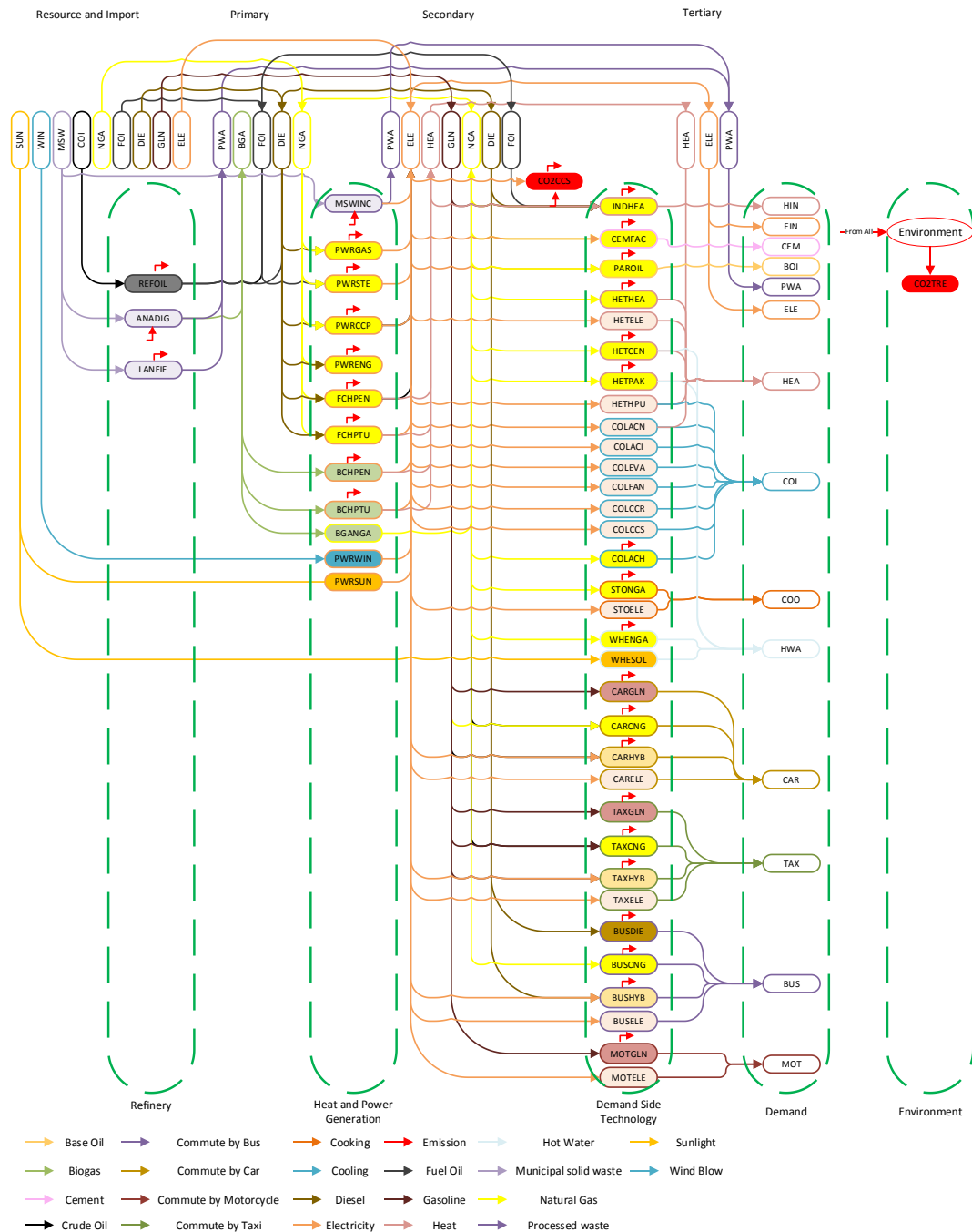
این مقاله با یک رویکرد یکپارچه سیستم، انرژی را از سطح انرژی مفید یا خدماتی که برای برآورد نیاز لازم است (مثل گرمایش یا تردد نه انرژی نهایی مثل گاز طبیعی یا بنزین) تا منابع مدل‌سازی می‌نماید. در نظر گرفتن این دامنه مدل‌سازی باعث خواهد شد که انتخاب فناوری‌های سطح تقاضا نیز در بهینه‌سازی قرار بگیرد و نهایتاً تقاضای انرژی نهایی نیز به جای برون‌زا بودن به یک متغیر تصمیم‌گیری تبدیل و بهینه شود. اجزای مدل عبارتند از: توسعه سناریو، مدل‌سازی تقاضا و مدل‌سازی یکپارچه دوسطحی. مدل دوسطحی در سطح بالا حداقل قیمت کربن را پیدا می‌کند و در سطح پایین، مدل ارزیابی یکپارچه انرژی سلامتی انتشار است. در واقع در این مدل دو سطحی دولت در سطح بالا بنا دارد قیمت کربن را به میزان حداقل آن به شرطی که سیاست‌ها اجرا شود تعیین کند. اما تصمیم بخش‌های دیگر در سطح پایین وابسته به قیمت کربن است تا حداقل هزینه را داشته باشند. بنابراین این مدل در دو سطح جداگانه و با تابع هدف متفاوت اجرا می‌شود. شکل ۲ مراحل انجام این پژوهش را نشان می‌دهد. در گام اول سناریوها مبتنی بر سناریوهای جهانی و اسناد بالادستی برای پیش‌بینی روندهای آتی سیستم انرژی و مقایسه آنها با یکدیگر توسعه می‌یابند و در گام دوم شرایط آب‌وهوایی برای محدوده مورد مطالعه تخمین زده شده است (Rezazadeh et al., 2024). سپس مدل تقاضای انرژی در بخش خانگی، صنعت و حمل‌ونقل توسعه داده شده است. در مرحله بعد، به کمک یک مدل یکپارچه دو سطحی شرایط بهینه سیستم انرژی و قیمت بهینه کربن تعیین گردیده است. در ادامه بخش‌های مختلف این روش تشریح می‌گردد.



شکل ۲. نمودار مفهومی مراحل انجام پژوهش (منبع: نگارندگان).

نمودار مرجع مدل این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. برای تهیه این نمودار مرجع از سایر مطالعات، سیاهه انتشار، داده‌های آماری و البته نظر کارشناسان استفاده شده است. این زنجیره از اجزای متعددی تشکیل شده است که در ادامه تشریح شده است.

تقاضا: تقاضا از سایر مدل‌ها به صورت اتصال نرم با این مدل یکپارچه شده است (Rezazadeh & Erfan Doraki et al., 2024; Avami, 2024). این مدل باید تقاضای زیاده‌فراوری شده (PWA)، برق (ELE)، گرمایش (HEA)، سرمایش (COL)، پخت و پز (COO)، آب گرم (HWA)، سیمان (CEM)، روغن پایه (BOI)، حمل‌ونقل با خودروی سواری (CAR)، تاکسی (TAX)، اتوبوس (BUS) و موتورسیکلت (MOT) را تامین کند. همچنین برق و حرارت مورد نیاز سایر صنایع به ترتیب با EIN و HIN در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. نمودار مرجع مدل یکپارچه (منبع: نگارندگان).

فرآوری زباله: همان‌طور که در *Error! Reference source not found.* نشان داده شده است زباله با فناوری هاضم بی‌هوازی (ANADIG)، دفن‌گاه (LANFIE) و زباله‌سوز (MSWINC) فرآوری می‌شود که محصول جانبی فرآوری زباله با هاضم بی‌هوازی و گاز زیستی (BGA) است و زباله‌سوز علاوه بر سوزاندن زباله برق نیز تولید می‌کند. گاز زیستی نیز می‌تواند در دو نوع فناوری تولید هم‌زمان موتور (BCHPEN) و توربینی (BCHPTU) به برق و حرارت تبدیل شود.

تولید برق: برق از طریق انواع نیروگاه شامل نیروگاه‌های خورشیدی (PWRSUN)، نیروگاه بادی (PWRWIN)، نیروگاه گازی

(PWRGAS)، نیروگاه بخار (PWRSTM)، نیروگاه سیکل ترکیبی (PWRCCP)، نیروگاه تولید هم‌زمان با موتور (FCHPEN)، نیروگاه تولید هم‌زمان توربینی (FCHPTU) و نیروگاه احتراق داخلی (PWRENG) تامین می‌شود. سوخت نیروگاه گازی، تولید هم‌زمان و سیکل ترکیبی گاز طبیعی (NGA) و نفت گاز (DIE) است و سوخت نیروگاه بخار گاز طبیعی و نفت کوره (FOI) است.

پالایشگاه: سوخت‌های مایع یا از خارج از محدوده مورد مطالعه وارد می‌شوند و یا در پالایشگاه نفت (REFOIL) تولید می‌شوند. نفت خام (OIL) و گاز طبیعی مورد نیاز پالایشگاه نیز از خارج از محدوده وارد می‌شود. بنزین (GLN) نیز علاوه بر این که از خارج از محدوده وارد می‌شود ممکن است در پالایشگاه تولید شود.

فناوری‌های گرمایش: برای تامین تقاضای گرمایش در بخش خانگی بخاری (HETHEA)، بخاری برقی (HETELE)، سیستم گرمایش مرکزی (HETCEN)، پکیج (HETPAK)، پمپ حرارتی (HETHPU) استفاده می‌شود البته کولر گازی با اینورتر (COLACI) و بدون اینورتر (COLACN) نیز در مد دوم خود می‌تواند تامین حرارت کنند.

فناوری‌های سرمایش: برای تامین سرمایش علاوه بر کولر گازی با اینورتر و بدون اینورتر، کولر آبی (COLEVA)، پنکه (COLFAN)، چیلر تراکمی روتاری (COLCCR)، چیلر تراکمی اسکرو (COLCCS)، چیلر جذبی (COLACH) نیز وجود دارد. البته پمپ حرارت نیز در مد دوم خود می‌تواند سرمایش ایجاد نماید.

فناوری‌های آبگرم: آبگرم کن (WHENGA) و آبگرم کن خورشیدی (WHESOL) برای تامین آب گرم در نظر گرفته شده است. علاوه بر این پکیج و گرمایش مرکزی نیز می‌توانند آب گرم را تامین کنند.

فناوری‌های پخت‌وپز: تقاضای پخت و پز نیز با دو فناوری اجاق گاز گازی (STONGA) و اجاق گاز برقی (STOELE) تامین می‌گردد.

صنایع: تقاضای سیمان و روغن پایه به ترتیب توسط شرکت سیمان تهران (CEMFAC) و شرکت نفت پارس (PAROIL) تامین می‌گردد.

حمل‌ونقل: در بخش حمل‌ونقل نیز تقاضای تردد با خودروی سواری (CAR)، تاکسی (TAX)، اتوبوس (BUS) و موتورسیکلت (MOT) باید تامین گردد. انواع خودروی سواری در این مطالعه عبارتند از خودروی بنزینی (CARGLN)، خودروی دوگانه سوز (CARCNG)، خودروی هیبریدی (CARHEB) و خودروی برقی (CARELE). برای تاکسی نیز به همین صورت تاکسی بنزینی (TAXGLN)، تاکسی دوگانه سوز (TAXCNG)، تاکسی هیبریدی (TAXHEB) و تاکسی برقی (TAXELE) وجود دارد. اتوبوس نیز در انواع دیزلی (BUSDIE)، گازسوز (BUSCNG)، هیبریدی (BUSHEB) و برقی (BUSELE) وجود دارد. موتورسیکلت نیز دارای دو نوع بنزینی (MOTGLN) و برقی (MOTGLE) است.

منابع جذب گازهای گلخانه‌ای: در این مطالعه، دو منبع جذب^۱ انتشار مستقیم شامل درخت (EMITRE) و جذب و ذخیره کربن (EMICCS) و همچنین دو سینک انتشار دیگر شامل هاضم بی‌هوازی (ANADIG) و زباله‌سوز (MSWINC) وجود دارد که از انتشار گازهای گلخانه‌ای دفن‌گاه جلوگیری می‌کند. برای مدل‌سازی منبع پسماند سرانه تولید زباله در سال‌های مختلف و هر سناریو متفاوت فرض شده است. به طوری که سرانه تولید زباله در سال پایه ۰/۹۶۷ گرم در روز به ازای هر نفر است (Alizadeh et al., 2023). این زباله به صورت تقاضای زباله فرآوری شده در نظر گرفته خواهد شد.

روابط مدل ارزیابی یکپارچه

به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم انرژی در این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی توسعه داده شده است. این مدل به صورت یکپارچه می‌تواند انرژی، انتشار و سلامتی را در کنار ارزیابی اقتصادی مدل نماید. با توجه به ساختار کلی مدل‌های بهینه‌سازی مدل از یک تابع هدف و قیود شامل مجموعه‌ها^۲، پارامترها^۳ و متغیرها^۱ تشکیل شده است. که به کمک روابط مختلف با یکدیگر ارتباط

1. GHG Sink
2. Sets
3. Parameters

برقرار می کنند و مدل را می سازند. مجموعه ها در این مطالعه عبارتند از: سال (y)، فناوری (t)، سوخت (f) و مد بهره برداری (m). معادلات این مطالعه را می توان به پنج دسته موازنه جریان ها، کفایت ظرفیت، ارزیابی انتشار، ارزیابی سلامتی و محاسبات اقتصادی تقسیم کرد. باید توجه داشت که در مسئله این پژوهش دو تصمیم گیر وجود دارد. اول خانوار و بنگاه است که با توجه به نظریه انتخاب عقلانی^۲ سعی دارد هزینه خود را به حداقل میزان برساند. تصمیم گیر دوم دولت است که می خواهد با تعیین بهینه قیمت کربن علاوه بر این که تعادل بازار را زیاد تغییر ندهد سیاست های اقلیمی خود را اجرا کند همچنین این پتانسیل در قیمت کربن وجود دارد که هزینه های سلامتی ناشی از آلودگی هوا را نیز جبران نماید. بنابراین دولت می خواهد قیمت بهینه کربن را به گونه ای تعیین کند که سیاست های اقلیمی اجرا شود و هزینه کربن جمع آوری شده بتواند هزینه سلامتی ناشی از تغییر اقلیم و آلودگی هوا را جبران کند. به منظور حل این مسئله نیاز به یک مدل دو سطحی است، که در سطح بالا دولت قیمت کربن را تعیین می کند و در سطح پایین بنگاه و خانوار فناوری ها و جریان انرژی را با توجه به انتخاب عقلانی انتخاب می کنند. در ادامه این مسئله به زبان ریاضی شرح داده شده است.

روابط موازنه جریان ها: مدل سازی عرضه انرژی و در اینجا مدل ارزیابی یکپارچه در گام اول با تقاضای انرژی که به صورت برونزا به مدل داده می شود آغاز می گردد. سپس مدل باید علاوه بر تامین تقاضای برونزای مدل، مصارف داخلی در زنجیره تامین را نیز فراهم نماید. بنابراین با توجه به رابطه ۴۷ جریان تولیدی (PF)^۳ در هر سال و برای همه جریان ها باید بیشتر از تقاضای آن جریان (DF)^۴ و جریان مصرفی (UF)^۵ آن در زنجیره تامین باشد. جریان تولیدی و جریان مصرفی از فناوری های مختلف و در مدهای مختلف هر فناوری تولید و مصرف می شوند. بنابراین با توجه به رابطه ۴۷ به ترتیب از جمع بر روی همه مدها و فناوری های تولید یک جریان با فناوری در یک مد خاص ($PFTM$)^۶ و نرخ استفاده یک جریان در فناوری و در یک مد خاص ($UFTM$)^۷ به دست می آید. مقدار $PFTM$ و $UFTM$ به کمک رابطه ۴ (۴ و ۵) تخمین زده می شود. در این رابطه ها OAR ^۸ و IAR ^۹ نرخ خروجی فعالیت و نرخ ورودی فعالیت است و ATM ^{۱۰} مجموع فعالیت یک فناوری در یک مد مشخص است. نسبت خروجی به فعالیت و ورودی به فعالیت مشخص می کند که به ازای یک واحد فعالیت چه میزان ورودی مورد نیاز است و چه میزان خروجی به دست می آید. فعالیت یک فناوری (AT)^{۱۱} برابر مجموع ATM در همه مدهای عملیاتی آن است رابطه ۶ (۶ و ۷) نشان می دهد که سطح فعالیت با هر مد بهره برداری به چه شکل بین حد بالای فعالیت (AUL)^{۱۲} و حد پایین فعالیت (ALL)^{۱۳} محدود می شود. بنابراین رابطه ۱ (تارابطه ۷) با برقراری موازنه جرم و انرژی علاوه بر تامین تقاضا برونزا و مصرف درون زنجیره بر روی میزان تولید نیز محدودیت اعمال می کنند.

$$PF(f, y) \geq DF(f, y) + UF(f, y)$$

رابطه ۱

1. Variables
2. Rational choice theory
3. Production Flow
4. Demand of Flow
5. Use Flow
6. Production of Flow by Technology by Mode
7. Use of Flow by Technology by Mode
8. Output Activity Ratio
9. Input Activity Ratio
10. Activity of a Technology by Mode
11. Activity of a Technology
12. Activity Upper Limit
13. Activity Lower Limit

$PF(f, y) = \sum_t \sum_m PFTM(t, m, f, y)$	رابطه ۲
$UF(f, y) = \sum_t \sum_m UFTM(t, m, f, y)$	رابطه ۳
$PFTM(t, m, f, y) = ATM(t, m, y) \times OAR(t, f, m, y)$	رابطه ۴
$UFTM(t, m, f, y) = ATM(t, m, y) \times IAR(t, f, m, y)$	رابطه ۵
$AT(t, y) = \sum_m ATM(t, m, y)$	رابطه ۶
$ALL(t, y) \leq \sum_m ATM(t, m, y) \leq AUL(t, y)$	رابطه ۷

روابط کفایت ظرفیت: برای تولید کافی از هر یک از جریان‌ها نیاز است تا ظرفیت مربوط به آن نیز موجود باشد. این دسته معادلات بررسی می‌کنند که ظرفیت کافی وجود داشته باشد و در صورت نیاز ظرفیت جدید تاسیس می‌کنند. بنابراین طبق رابطه (۸) AT باید کوچک‌تر از حاصل ضرب کل ظرفیت سالانه یک فناوری (ACT)^۱ در ضریب ظرفیت (CF)^۲ و ضریب تبدیل ظرفیت به فعالیت (CAU)^۳ باشد. این دو ضریب دیگر پارامتر مهم برای مدل هستند که با توجه به هر فناوری به صورت جداگانه تعریف شده است. ضریب تبدیل ظرفیت به فعالیت مشخص می‌نماید که به کارگیری یک واحد ظرفیت به صورت کامل در یک سال منجر به چه میزان فعالیت خواهد شد.

$$AT(t, y) \leq ACT(t, y) \times CF(t, y) \times CAU(t) \quad \text{رابطه ۸}$$

ACT برابر مجموع، ظرفیت انباشته جدید یک فناوری ($ANCT$)^۴ و ظرفیت باقیمانده یک فناوری (RCT)^۵ است.

رابطه ۴۷. RCT تعیین می‌کند که پیش از شروع مدلسازی چه مقدار ظرفیت از هر فناوری وجود داشته و در سال مورد مطالعه همچنان وجود دارد. بنابراین اگر ظرفیت باقیمانده کافی نباشد ظرفیت جدید اضافه می‌شود.

$$ACT(t, y) = ANCT(t, y) + RCT(t, y) \quad \text{رابطه ۹}$$

$ANCT$ به عنوان جمع ظرفیت انباشته جدید یک فناوری (NCT)^۶ از سال اول تا سال مورد مطالعه (بدون احتساب ظرفیت‌هایی که عمر آن‌ها به پایان رسیده است) با توجه به رابطه ۴۷ محاسبه می‌شود. در این رابطه OL ^۷ عمر فناوری است.

$$ANCT(t, y) = \sum_{yy, y-yy < OL(t) \& y-yy \geq 0} NCT(t, yy) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

ACT بین حد بالایی ظرفیت (CUL)^۸ و حد پایینی ظرفیت (CLL)^۹ قرار دارد (رابطه ۴۷). این قید می‌تواند برای ساخت شرایط سال پایه و یا برای اعمال برنامه‌های سیاستی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین رابطه (۸-۱۱) به محاسبات مربوط به ظرفیت فناوری‌ها و کفایت آن برای تولید کافی جریان‌ها می‌پردازد.

1. Annual Capacity of a Technology
2. Capacity factor
3. Capacity to activity unit
4. Accumulated New Capacity of a Technology
5. Residual Capacity of a Technology
6. New Capacity of a Technology
7. Operation Life
8. Capacity Upper Limit
9. Capacity Lower Limit

$$CLL(t, y) \leq ACT(t, y) \leq CUL(t, y) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

روابط ارزیابی انتشار: پس از تکمیل مدل انرژی، این قسمت از روابط ارزیابی انتشار را به مدل اضافه می‌کند. مجموع سالانه انتشار فناوری در هر مد بهره‌برداری ($ATEM$)^۱ برابر است با انتشار در واحد فعالیت (EAR)^۲ ضرب در EAR در واقع ضریب انتشار آلاینده‌های مختلف را وارد مدل خواهد نمود. از این‌رو برای استفاده از آن باید میزان انتشار هر آلاینده به ازای یک واحد فعالیت برای هر فناوری تخمین زده شود و وارد مدل گردد (Hojjat & Zinti, 2021; US EPA, 2024). با توجه به رابطه (۱۳) با جمع $ATEM$ در همه مدهای بهره‌برداری انتشار سالانه فناوری (ATE)^۳ حساب می‌شود. انتشار سالانه (AE)^۴ با جمع روی فناوری در ATE حساب می‌شود. میزان انتشار سالانه ممکن است با تعیین حد بالای انتشار سالانه (AEL)^۵ مشابه رابطه (۱۵) محدود گردد. به عنوان مثال سیاست خالص

انتشار صفر با اعمال این قید فعال می‌گردد.

$$ATEM(t, m, y, e) = EAR(t, m, y, e) \times ATM(t, m, y) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$ATE(t, y, e) = \sum_m ATEM(t, m, y, e) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$AE(y, e) = \sum_t ATE(t, y, e) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$AE(y, e) \leq AEL(y, e) \quad \text{رابطه ۱۵}$$

روابط ارزیابی اثر سلامتی: برای مدل‌سازی اثرات محیط‌زیستی در مدل یکپارچه از روش *Recipe* استفاده شده است. این روش یکی از رایج‌ترین روش‌های ارزیابی اثر در مطالعات چرخه عمر است. سه اثر نهایی شامل تخریب سلامتی انسان، تخریب اکوسیستم و تخریب دسترسی به منابع در این روش بررسی می‌شود. در بین اثرات سلامتی، افزایش بیماری‌های تنفسی، افزایش سرطان، افزایش سایر بیماری‌ها و افزایش سوء تغذیه در این مدل قرار دارد. با توجه به اهداف این پژوهش، سه اثر میانی در نظر گرفته شده است که عبارتند از: گرم شدن کره زمین، تشکیل ازن، و تشکیل ذرات معلق. علاوه بر این اثر نهایی تخریب سلامتی انسان (ناشی از سه اثر میانی گفته شده) نیز در مدل قرار داده شده است. این پیامدها ناشی از انتشار آلاینده‌هایی مانند $CO_{2,eq}$, NO_x , NO , NO_3 , $NMVO$, NH_3 , SO_2 , $PM_{2.5}$ است. با توجه به تاثیر تغییرات اقلیم بر سلامت انسان، این مطالعه به بررسی افزایش خطر بیماری‌هایی مانند سوء تغذیه، مالاریا، بیماری‌های قلبی عروقی و اسهال می‌پردازد. علاوه بر این، تشدید سیل ساحلی و داخلی، آسیب بالقوه به رفاه انسان را بیشتر می‌کند (Goedkoop & Huijbregts, 2013; Hollander & Et.al, 2017).

در رابطه ۴۷ اثر سلامتی ناشی از تغییر اقلیم با فناوری در مد بهره‌برداری ($ATHGM$)^۶ به کمک ضرب $ATEM$ گازهای گلخانه‌ای در ضریب تعیین برای اثر نهایی سلامتی انسان ناشی از تغییر اقلیم ($CFEHG$)^۷ حساب می‌شود.

$$ATHGM(t, y, m) = ATEM(t, m, y, CO_2) \times CFEHG \quad \text{رابطه ۱۶}$$

اثر سلامتی ناشی از تغییر اقلیم برای هر فناوری به صورت سالانه ($ATHG$)^۸ با جمع روی مدهای بهره‌برداری $ATHGM$ حساب

1. Annual Technology emissions by Mode
2. Emission Activity Ratio
3. Annual Technology emissions
4. Annual Emissions
5. Annual Emission Limit
6. Annual Technology Human Health Impact due to Global Warming by Mode
7. Characterization Factor for the Endpoint of Human Health due to Global Warming
8. Annual Technology Human Health due to Global Warming

می‌شود. همچنین اثر سلامتی ناشی از تغییر اقلیم در سال $(AHG)^1$ به کمک رابطه حساب می‌گردد.

$$ATHG(t, y) = \sum_m ATHGM(t, m, y) \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$AHG(y) = \sum_t ATHG(t, y) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

بر اساس روش *Recipe*، تشکیل ازن با پیامدهای سلامتی همراه است که منجر به مشکلات تنفسی مانند مرگ و میر تنفسی، بیماری‌های تنفسی (از جمله آسم و بیماری‌های انسداد مزمن ریوی $(COPD)^2$) و مرگ و میر حاد می‌شود (Goedkoop & Huijbregts, 2013; Hollander & Et.al, 2017).

رابطه (۴۷) معرف اثر سلامتی ناشی از تشکیل ازن برای یک مد بهره‌برداری مشخص از فناوری به صورت سالانه $(ATHOM)^3$ است. که در آن $CFMHO^4$ و $CFEHO^5$ به ترتیب ضریب تاثیر اثر میانی تشکیل ازن و ضریب تاثیر تبدیل اثر نهایی سلامتی انسان ناشی از تشکیل ازن است. جمع این مقدار بر روی همه مدهای بهره‌برداری اثر سلامتی ناشی از تخریب لایه ازن فناوری $(ATHO)^6$ را با توجه به رابطه (۴۷) نشان می‌دهد. که مجموع آن بر روی تکنولوژی نیز مقدار اثر تشکیل ازن سالانه $(AHO)^7$ را نشان می‌دهد.

$$ATHOM(t, y, m) = \left(\sum_{e=\{NO_x, NO, NO_3, NMVOC\}} ATEM(t, m, y, e) \times CFMHO(e) \right) \times CFEHO \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$ATHO(t, y) = \sum_m ATHOM(t, m, y) \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

تشکیل ذرات عامل اولیه‌ای است که به اثرات نامطلوب سلامتی، به ویژه سرطان ریه و مرگ و میر قلبی عروقی منجر می‌شود. این بیماری با مرگ و میر مزمن، مرگ و میر حاد، عوارض حاد تنفسی و عوارض حاد قلبی عروقی همراه است (Goedkoop & Huijbregts, 2013; Hollander & Et.al, 2017). اثر سلامتی ناشی از ذرات به کمک مجموع رابطه (۴۷) تخمین زده می‌شود.

$$ATHPM(t, y, m) = \left(\sum_{e=\{NH_3, NO_x, SO_2, PM_{2.5}, NO, NO_2, NO_3, SO, SO_x, SO_3\}} ATEM(t, m, y, e) \times CFMHP(e) \right) \times CFEHP \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$ATHP(t, y) = \sum_m ATHPM(t, m, y) \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$AHP(y) = \sum_t ATHP(t, y) \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

اثر سلامتی فناوری ناشی از آلودگی هوا $(ATHA)^8$ مجموع اثر سلامتی ناشی از تشکیل ازن و ذرات است و کل اثر سلامتی فناوری $(ATH)^9$ برابر مجموع اثر سلامتی ناشی از آلودگی هوا و تغییر اقلیم است. بنابراین با توجه به رابطه (۴۷) ارزیابی سلامتی ناشی از آلودگی

1. Annual Human Health due to Global Warming
2. Chronic Obstructive Pulmonary Diseases
3. Annual Technology Human Health Impact due to Ozone Formation by Mode
4. Midpoint of Human Health due to Ozone Formation
5. Endpoint of Human Health due to Ozone Formation
6. Annual Technology Human Health due to Ozone Formation
7. Annual Human Health due to Ozone Formation
8. Annual Technology Human Health due to Air pollution
9. Annual Technology Human Health

هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای صورت می‌گیرد.

$$ATHA(t, y) = ATHO(t, y) + ATHP(t, y) \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$ATH(t, y) = ATHA(t, y) + ATHG(t, y) \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$AHA(y) = AHO(y) + AHP(y) \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$AH(y) = AHA(y) + AHG(y) \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

روابط ارزیابی اقتصادی: دسته معادلات پیش رو، محاسبات اقتصادی مربوط به مسئله را پیش می‌برند. هزینه‌ها عبارتند از: هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری، جریمه انتشار و هزینه سلامتی. هزینه بهره‌برداری نیز متشکل از هزینه متغیر، هزینه سوخت و هزینه منبع است. هزینه سلامتی نیز از دو قسمت هزینه سلامتی ناشی از آلودگی هوا و هزینه سلامتی ناشی از تغییر اقلیم تشکیل شده است. نهایتاً همه هزینه‌ها تنزیل می‌شوند تا قابل مقایسه شوند. هزینه سرمایه‌گذاری فناوری (CIT)^۱ برابر است با ضرب هزینه سرمایه فناوری (CCT)^۲ در ظرفیت جدید فناوری (NCT)^۳، همان‌طور که در رابطه (۴۷) نشان داده شده است.

$$CIT(t, y) = CCT(t, y) \times NCT(t, y) \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

هزینه سرمایه‌گذاری بر اساس ظرفیت واحد و هزینه بهره‌برداری بر اساس فعالیت واحد در نظر گرفته شده است. مقادیر مربوط به این هزینه‌ها به کمک منابع معتبر و تا حد امکان برای هر سناریو به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است. هزینه بهره‌برداری فناوری (OCT)^۴ برابر ضرب AT در هزینه‌های بهره‌برداری فناوری شامل هزینه متغیر فناوری (ATVC)^۵، هزینه سالانه سوخت فناوری (ATFC)^۶ و هزینه سالانه منبع (ATSC)^۷ است.

$$OCT(t, y) = AT(t, y) \times (ATVC(t, y) + ATFC(t, y) + ATSC(t, y)) \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

ATFC^۸ با رابطه (۴۷) حساب می‌شود. همچنین ATSC^۹ به کمک رابطه (۴۷) حساب می‌شود که در آن S یک پارامتر صفر و یکی است که مشخص می‌کند فناوری منبع هست یا خیر.

$$ATFC(t, y) = RUT(t, y) \times FC(f, y) \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$ATSC(t, y) = RPT(t, y) \times FC(f, y) \times S(f) \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

جریمه انتشار گازهای گلخانه‌ای فناوری (GPT)^{۱۰} برابر است با انتشار سالانه فناوری (ATE)^{۱۱} برای گازهای گلخانه‌ای ضربدر جریمه انتشار گازهای گلخانه‌ای (GP)^{۱۲}.

1. Capital Investment by Technologies
2. Capital Cost of a Technology
3. New Capacity of Technologies
4. Operation Cost by Technologies
5. Annual Technology Variable Cost
6. Annual Technology Fuel Cost
7. Annual Technology Source Cost
8. Annual Technology Fuel Cost
9. Annual Technology Source Cost
10. GHG emission Penalty by Technology
11. Annual Technology Emission
12. GHG emissions Penalty

$$GPT(t, y) = ATE(t, y, CO_{2,eq}) \times GP(y) \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

جریمه انتشار گازهای گلخانه‌ای تعیین می‌کند که به ازای هر واحد انتشار چه میزان هزینه اقتصادی باید در نظر گرفته شود (InternationalEnergyAgency, 2022). هزینه سلامتی فناوری ناشی از آلودگی هوا (ATHA) و هزینه سلامتی فناوری (ATH) به ترتیب به کمک رابطه (۴۷) تخمین زده می‌شود. که در آن HC^1 هزینه سلامتی است. به کمک رابطه (۴۷) هزینه‌های مربوطه را می‌توان تنزیل کرد که در این رابطه‌ها DR^2 نرخ تنزیل است.

$$ATHAC(y, t) = ATHA(y, t) \times HC(y) \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$ATHC(y, t) = ATH(y, t) \times HC(y) \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$DCIT(t, y) = \frac{CIT(t, y)}{(1 + DR)^{y - \min(YEAR)}} \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

$$DOCT(t, y) = \frac{OCT(t, y)}{(1 + DR)^{y - \min(YEAR) + 0.5}} \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

$$DGPT(t, y) = \frac{GPT(t, y)}{(1 + DR)^{y - \min(YEAR) + 0.5}} \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

$$DTHAC(t, y) = \frac{ATHAC(t, y)}{(1 + DR)^{y - \min(YEAR) + 0.5}} \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

$$DTHC(t, y) = \frac{ATHC(t, y)}{(1 + DR)^{y - \min(YEAR) + 0.5}} \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

DECT با توجه به رابطه (۴۰) برابر است با هزینه تنزیل شده سرمایه‌گذاری برای فناوری (DCIT)^۳ و مجموع هزینه تنزیل شده بهره‌برداری برای فناوری (DOCT)^۴.

$$DECT(t, y) = DCIT(t, y) + DOCT(t, y) \quad \text{رابطه (۴۰)}$$

مجموع هزینه‌های اقتصادی تنزیل شده (TDEC)^۵، مجموع جریمه انتشار ناشی از گازهای گلخانه‌ای تنزیل شده (TDGP)^۶، مجموع هزینه سلامتی ناشی از آلودگی هوای تنزیل شده (TDAC)^۷ و هزینه سلامتی ناشی از تغییر اقلیم تنزیل شده (TDCC)^۸ به ترتیب در رابطه (۴۷) نشان داده شده است.

$$TDEC = \sum_y \sum_t DECT(t, y) \quad \text{رابطه (۴۱)}$$

$$TDGP = \sum_y \sum_t DGPT(t, y) \quad \text{رابطه (۴۲)}$$

1. Health Cost
2. Discount Rate
3. Discounted Capital Investment by Technologies
4. Discounted Operation Cost by Technologies
5. Total Discounted Economic Cost
6. Total Discounted GHG emission Penalty
7. Total Discounted Air pollution health Cost
8. Total Discounted Climate change health Cost

$$TDAC = \sum_y \sum_t DACT(t, y) \quad \text{رابطه (۴۳)}$$

$$TDCC = \sum_y \sum_t DCCT(t, y) \quad \text{رابطه (۴۴)}$$

در سطح پایین، بنگاه و خانوار بنا دارند با توجه به نظریه انتخاب عقلانی به گونه‌ای تصمیم‌گیری کند که حداقل هزینه را داشته باشد. بنگاه و خانوار دو هزینه را متحمل می‌شوند یکی هزینه اقتصادی و دیگری جریمه انتشار که از سمت دولت تحمیل شده است. بنابراین تابع هدف سطح پایین همان طور که در رابطه (۴۷) نشان داده شده است برابر حداقل کردن مجموع هزینه اقتصادی و جریمه انتشار است. همان طور که نشان داده شد رابطه (۴۷) محاسبات اقتصادی و تابع هدف سطح پایین را دنبال می‌کنند.

$$\min TDEC + TDGP \quad \text{رابطه (۴۵)}$$

ارزیابی قیمت کربن بهینه: اگر چه یک عامل شامل خانوار و بنگاه در سطح پایین با توجه به رابطه (۴۷) هزینه اقتصادی و جریمه انتشار خود را حداقل می‌کند ولی عامل دیگری به نام دولت نیز وجود دارد که با تعیین قیمت کربن سعی دارد سیاست‌های خود را به گونه‌ای اجرا کند که اولاً حداقل تغییر در تعادل بازار را ایجاد کند و ثانیاً جریمه انتشار جمع‌آوری شده توانایی جبران پیامدهای سلامتی را نیز داشته باشد. بنابراین برای به حداقل رساندن تغییر از تعادل بازار لازم است تا جریمه انتشار حداقل مقدار خود باشد که با توجه به رابطه (۴۷) در تابع هدف سطح بالا قرار گرفته است. از طرفی نیاز است تا جریمه جمع‌آوری شده بتواند هزینه سلامتی را جبران کند که با توجه به رابطه (۴۷) در قید سطح بالا قرار داده شده است. علاوه بر این باید توجه داشت که با توجه به رابطه (۴۷) در صورتی که در سطح پایین جریمه انتشار متغیر تصمیم‌گیر باشد مدل غیرخطی می‌شود که مطلوب نیست.

$$\min GP(y) \quad \text{رابطه (۴۶)}$$

s.t

$$DHC(y) = DGP(y) \quad \text{رابطه (۴۷)}$$

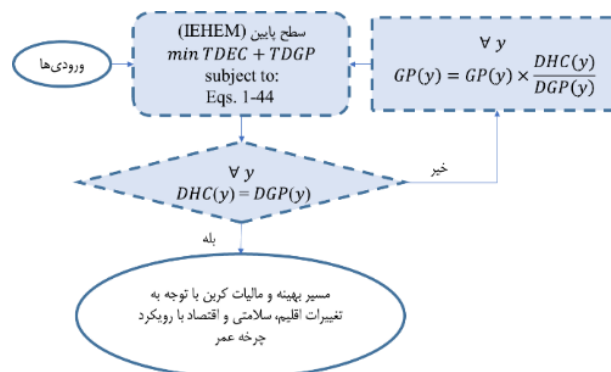
where

$$\min TDEC + TDGP$$

s.t

رابطه‌های (۱ تا ۴۴)

برای حل این مسئله دو سطحی نیاز به الگوریتمی است که امکان محاسبه و اجرای مدل را داشته باشد. بنابراین الگوریتمی مشابه الگوریتم شهبازی و همکاران (۲۰۲۴) به کار گرفته شده است (Shahbazi et al., 2024). در این الگوریتم با توجه به شکل ۳ ابتدا ورودی‌ها وارد مدل ارزیابی یکپارچه می‌شوند که در اجرای اول جریمه انتشار صفر است. پس از مشخص شدن نتایج، جریمه انتشار تنزیل شده برابر هزینه سلامتی تنزیل شده در نظر گرفته می‌شود و با توجه به آن جریمه انتشار جدید تعیین می‌گردد و مدل دوباره اجرا می‌شود. این حلقه بارها تکرار می‌شود تا با جریمه انتشار مشخصی شرط ذکر شده در رابطه (۴۷) برقرار گردد.



شکل ۳. تعیین مالیات کربن به کمک حل به روش دو سطحی (منبع: نگارندگان).

یافته‌های پژوهش

برای انجام مطالعه و مشخص نمودن شرایط بیرونی موثر بر مدل و نتایج تعدادی سناریو تدوین می‌گردد. هر سناریو دارای یک داستان است که شرایط آینده موثر بر نتایج مدل را مشخص می‌نماید. در این مطالعه چهار سناریو با توجه به سایر مطالعات و اسناد بالادستی تدوین شده است. هر سناریو علاوه بر شرایط اقتصادی اجتماعی در برگیرنده شرایط اقلیمی نیز هست. در دل هر سناریو رفتارهای خانوار، بنگاه و دولت تا حدودی به تصویر کشیده شده است. هر سناریو تعیین‌کننده پارامترها و قیود مسئله هستند. در نام‌گذاری سناریوها از نام حیوانات اصیل ایرانی استفاده شده است که عبارتند از: یوزپلنگ ایرانی، کاراکال، کفتار راه‌راه و خرس سیاه بلوچی که همگی از حیوانات موجود در طبیعت غنی ایران هستند. سناریوی یوزپلنگ ایرانی شرایطی را به تصویر می‌کشد که تهران با سرعت زیاد اهداف محیط‌زیستی را دنبال می‌کند و دارای هدف خالص انتشار صفر است، در این سناریو شرایط جهانی مشابه سناریوی SSP1-2.6 است. در سناریوی کاراکال هدف انتشار صفر وجود ندارد اما ایران اسناد محیط‌زیستی خود را اجرا می‌کند. شرایط جهانی در این سناریو مشابه SSP2-4.5 است. در سناریوی خرس سیاه بلوچی مهم‌ترین هدف اقتصاد و رشد اقتصادی هر چه بیشتر است، این در حالی است که سناریوی کفتار شرایطی را به تصویر می‌کشد که رویکردها منطقه‌ای است و توجهی به تغییر اقلیم که یک موضوع جهانی است وجود ندارد. بنابراین حداقل شدن هزینه‌ها موردنظر است. سناریوی جهانی در این دو سناریو به ترتیب مشابه SSP5-8.5 و SSP3-7.0 است. نرخ تنزیل در سناریوهای یوزپلنگ، کاراکال، خرس و کفتار به ترتیب ۸، ۷، ۸ و ۶ در نظر گرفته شده است (Emmerling et al., 2019; Stott, 1999). به دلیل رعایت اختصار سایر جزییات سناریوها در این مقاله ذکر نشده است (Rezazadeh et al., 2024; Erfan Doraki et al., 2024). در این مطالعه سال مبنا ۲۰۱۷ در نظر گرفته و سپس از ۲۰۲۵ به صورت پنج سال - پنج سال مدل‌سازی صورت خواهد گرفت. لازم به ذکر است که جزییات سناریوها مثل وضعیت سیستم عرضه (نوع فناوری، انواع حامل‌های انرژی، سهم هر کدام و غیره)، جزییات تقاضا و آلودگی هوا، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های اقتصادی وابسته به خروجی نتایج مدل است.

جدول ۱. مالیات کربن و سایر متغیرهای مستخرج از مدل دوسطحی با مالیات بهینه کربن (منبع: یافته‌های تحقیق)

سناریوها	۲۰۲۵	۲۰۳۰	۲۰۳۵	۲۰۴۰	۲۰۴۵	۲۰۵۰
یوزپلنگ	۱۶/۴	۶۱/۴	۱۸/۵	۸۶/۵	۵۸/۶	
کاراکال	۳۴/۳	۸۵/۳	۲۶/۴	۶۰/۴	۱۳/۵	۶۱/۵
خرس	۷۱/۳	۲۶/۴	۰۱/۵	۸۹/۵	۹۰/۶	۸۹/۷
کفتار	۲۸/۳	۴۶/۳	۶۶/۳	۸۵/۳	۰۷/۴	۲۶/۴
یوزپلنگ	۳۸/۹۳۸۲۸	۰۲/۹۱۸۶۳	۳۹/۹۱۰۹۲	۳۹/۹۱۱۵۹	۸۴/۸۹۵۸۱	۰۰/۰
کاراکال	۶۷/۷۹۲۰۴	۸۲/۸۱۰۹۷	۰۶/۷۵۳۱۶	۵۶/۶۳۸۴۵	۰۸/۵۸۱۹۵	۹۰/۵۰۵۱۲
خرس	۷۲/۱۱۳۹۱۸	۱۳/۱۱۷۷۶۴	۰۴/۱۲۲۶۵۲	۰۸/۱۲۴۸۴۵	۹۴/۱۲۹۴۱۱	۴۳/۱۴۰۴۲۴
کفتار	۳۳/۹۸۲۹۰	۵۱/۱۰۰۸۰۹	۷۳/۱۰۲۳۵۵	۸۵/۱۰۲۱۲۶	۰۴/۱۰۴۲۲۶	۶۷/۹۶۸۰۶
یوزپلنگ	۱۰/۲۵۸	۰۵/۲۱۹	۲۱/۱۹۱	۸۵/۱۶۹	۷۲/۱۴۶	۰۰/۰
کاراکال	۱۵/۱۸۰	۵۱/۱۶۱	۹۹/۱۲۹	۲۷/۹۳	۲۹/۷۴	۲۵/۵۵
خرس	۳۳/۲۷۹	۶۰/۲۵۹	۹۷/۲۴۸	۴۹/۲۳۳	۲۲/۲۲۲	۱۰/۲۱۶
کفتار	۰۳/۲۱۳	۴۵/۱۸۰	۸۴/۱۵۱	۰۳/۱۲۵	۶۱/۱۰۵	۴۴/۸۰
یوزپلنگ	۲۷/۴۶۰۶	۴۴/۸۷۹	۰۷/۱۳۲۳	۰۰/۳۲۵۳	۷۹/۱۲۹۱	۰۷/۳۲۶۸
کاراکال	۹۱/۴۴۱۷	۸۵/۳۸۴	۱۱/۳۱۱	۶۴/۲۱۳۱	۳۱/۲۴۴	۰۴/۲۱۶
خرس	۲۸/۴۵۹۷	۵۷/۶۰۱	۸۹/۶۷۹	۶۳/۶۸۴	۶۴/۵۸۶	۶۷/۵۴۰
کفتار	۵۶/۴۴۸۱	۲۷/۲۵۰	۷۱/۲۰۶	۶۳/۲۲۱	۸۲/۱۸۹	۲۱/۱۱۰
یوزپلنگ	۷۵/۳۹۰	۲۴/۴۲۳	۵۳/۴۷۱	۵۸/۵۳۴	۳۵/۵۸۹	۱۴/۳۱
کاراکال	۷۴/۲۷۲	۰۶/۳۱۲	۵۶/۳۲۰	۵۶/۲۹۳	۴۲/۲۹۸	۲۷/۲۸۳
خرس	۸۹/۴۲۲	۶۱/۵۰۱	۹۷/۶۱۳	۹۰/۷۳۴	۶۵/۸۹۲	۸۸/۱۱۰۷
کفتار	۵۲/۳۲۲	۶۶/۳۴۸	۴۵/۳۷۴	۵۳/۳۹۳	۲۴/۴۲۴	۴۱/۴۱۲

ادامه جدول ۲. مالیات کربن و سایر متغیرهای مستخرج از مدل دوسطحی با مالیات بهینه کربن (منبع: یافته های تحقیق)

سناریوها	۲۰۲۵	۲۰۳۰	۲۰۳۵	۲۰۴۰	۲۰۴۵	۲۰۵۰
یوزپلنگ	۶۳/۹۵۱۵۱	۰۷/۹۲۱۹۱	۱۸/۹۰۸۴۴	۳۶/۹۰۷۴۳	۸۶/۸۸۴۹۷	۰۲/۴۱۸۰
کاراکال	۷۲/۸۱۱۰۲	۴۷/۸۴۹۳۱	۲۸/۷۹۰۳۴	۸۴/۶۵۰۸۲	۳۲/۵۹۵۶۲	۸۲/۵۱۱۵۸
خرس	۶۹/۱۱۸۷۱۷	۶۱/۱۲۱۵۴۵	۳۹/۱۲۵۵۵۲	۴۳/۱۲۶۳۶۰	۹۴/۱۳۰۳۹۹	۰۷/۱۳۹۷۷۹
کفتار	۱۶/۱۰۰۵۶۱	۱۸/۱۰۲۶۸۱	۴۱/۱۰۳۴۰۷	۰۲/۱۰۱۹۰۹	۳۴/۱۰۳۷۴۴	۸۱/۹۶۱۱۵

ATH (DALY)

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، مالیات کربن برای سال‌های مختلف و در هر سناریو با استفاده از مدل یکپارچه انتشار-سلامت- انرژی توسعه یافته تعیین شده است. حلقه نشان داده شده در شکل ۳ چندین بار تکرار می‌شود تا نتیجه نهایی مشخص شود. مالیات کربن در سناریوی یوزپلنگ بیشتر از سایرین است. با این حال، از سال ۲۰۴۰ به بعد، مالیات کربن در سناریوی خرس از سناریوی یوزپلنگ فراتر می‌رود. کمترین مالیات کربن به سناریوی کفتار اختصاص دارد. در سال ۲۰۵۰ و در سناریوی یوزپلنگ، محدودیت انتشار خالص صفر وجود دارد که در نتیجه انتشار خالص در این سناریو صفر است. بنابراین، تعیین مالیات کربن بر اساس این رویکرد ممکن است امکان‌پذیر یا ضروری نباشد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، در تمامی سناریوها اعمال قیمت بر کربن ضروری است، اما میزان این قیمت در هر سناریو متفاوت است. بالاترین نرخ کربن در ابتدای دوره مدل‌سازی در سناریوی یوزپلنگ مشاهده می‌شود، در حالی که در انتهای دوره، این مقدار در سناریوی خرس به اوج خود می‌رسد. از سوی دیگر، کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به سناریوی یوزپلنگ مربوط است، در حالی که بیشترین انتشار در سناریوی خرس رخ می‌دهد. همچنین، بیشترین درآمد دولت از محل جریمه‌های ناشی از انتشار آلاینده‌ها در سناریوی خرس حاصل شده است. از نظر اثرات بهداشتی، سناریوی کاراکال کمترین آسیب را به سلامت انسان وارد کرده است، به جز در سال ۲۰۵۰ که سناریوی یوزپلنگ عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

بحث

در سال ۲۰۲۵، بیشترین قیمت کربن مربوط به سناریوی یوزپلنگ است که معادل ۴/۱۶ دلار به ازای هر تن تعیین شده است. این مقدار تقریباً معادل با نرخ برنامه تجارت انتشار شهر توکیو است که در همان سال حدود ۴/۰۱ دلار بوده است. سایر سناریوها در این سال نرخ‌هایی بین ۳/۲۸ تا ۳/۷۱ دلار دارند. برای مثال، سناریوی کفتار با پایین‌ترین نرخ، معادل ۳/۲۸ دلار، عملکردی نزدیک به کشورهای مانند مکزیک با قیمت ۳/۹۴ دلار و ژاپن با نرخ ۱/۹۲ دلار دارد. در سال ۲۰۳۰، قیمت کربن در تمامی سناریوها روندی افزایشی داشته است. در سناریوی یوزپلنگ، نرخ به ۴/۶۱ دلار رسیده که با نرخ برنامه تجارت انتشار در استان فوجیان چین با مقدار حدود ۴/۷۲ دلار در سال ۲۰۲۵ قابل مقایسه است. همچنین، سناریوی خرس در این سال نرخ ۴/۲۶ دلار را نشان می‌دهد که اندکی از نرخ بازار توکیو پیشی گرفته است. در سال ۲۰۵۰، که آخرین سال دوره مدل‌سازی است، اختلاف بین سناریوها قابل توجه می‌شود. بالاترین نرخ مربوط به سناریوی خرس با مقدار ۷/۸۹ دلار بر تن است. قیمت در سناریوی خرس هنوز بیشتر از کلمبیا (۶/۵۴) و کمتر از ماساچوست (۹/۳) است (World Bank, 2025). اگر چه قیمت‌های به‌دست آمده مشابه قیمت‌های موجود در برخی بازارهای کربن است و حتی از برخی دیگر بیشتر هم هست، مالیات کربن تعیین شده توسط این روش نسبت به مطالعات ذکر شده در پیشینه پژوهش و همچنین قیمت‌های موجود در برخی کشورها کمتر است. این نشان می‌دهد که مالیات کربن مشخص شده در مطالعات قبلی بالاتر از حد لازم برای کاهش انتشار است. انتخاب مالیات کربن بیش از حد بالا در مطالعات قبلی آن را غیرقابل اجرا کرده است. بنابراین، استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله برای تعیین مالیات کربن به شدت توصیه می‌شود. دلیل قیمت پایین در این روش در پتانسیل‌های کاهش انتشار سودآوری در این محدوده نهفته است که در این مطالعه با گسترش یک مدل ارزیابی یکپارچه به خوبی مدل شده است. از طرفی باید توجه داشت که قیمت کربن برای هر مورد مطالعه با توجه به پتانسیل‌های موجود در آن ممکن است متفاوت باشد. جدول ۱ مالیات کربن را برای سال‌های مختلف و تحت سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. علاوه بر این، توجه به این نکته مهم است که مالیات کربن بالاتر لزوماً منجر به کاهش انتشار نخواهد شد. به عنوان مثال، در سناریوی خرس، مالیات کربن پس از سال ۲۰۴۰ از سناریوی یوزپلنگ بیشتر است، اما

انتشار گازهای گلخانه‌ای در این سناریو نیز بیشتر است. با توجه به این که مالیات کربن هزینه‌های سلامت را جبران می‌کند، سناریوهایی با هزینه‌های بهداشتی بالاتر، مالیات کربن بالاتری را برای جبران خسارات وارده تضمین می‌کنند. به نظر می‌رسد که مکانیسم‌های دیگر، به ویژه تغییرات رفتاری، تأثیر بیشتری بر کاهش انتشار داشته‌اند. مالیات کربن صرفاً به عنوان یک محرک عمل می‌کند و باید با سایر پیش‌نیازهای توسعه پایدار برای کاهش موثر انتشار تکمیل شود. مالیات کربن پیشنهادی به خوبی با منحنی‌های هزینه کاهش حاشیه‌ای مطابقت دارد که نشان‌دهنده هماهنگی بین آن‌ها است. روند انتشار گازهای گلخانه‌ای در سناریوهای مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. این روند نشان می‌دهد که انتشار در سال‌های اولیه به شدت کاهش می‌یابد و منجر به کاهش قابل‌توجهی از ۵۳۷ میلیون تن انتشار گازهای گلخانه‌ای به سطوح بسیار پایین‌تر می‌شود. این موضوع در همه سناریوها نشان می‌دهد که اقدامات متعددی وجود دارد که از نظر اقتصادی در شرایط مختلف مقرون به صرفه هستند و منجر به کاهش انتشار می‌شوند. با وجود کاهش انتشار در سال‌های اولیه در همه سناریوها، سناریوی خرس از سال ۲۰۲۵ به بعد با افزایش انتشار روبه‌رو است. همچنین، روند کاهش در سناریوی کاراکال حتی تندتر از سناریوی یوزپلنگ است، به جز در سال ۲۰۵۰ که محدودیت هدف انتشار صفر فعال شده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به صفر می‌رساند. این موضوع نشان می‌دهد که اسناد داخلی ایران به تنهایی می‌تواند شرایط را برای کاهش انتشار فراهم سازد. با وجود افزایش جریمه‌های انتشار، مجموع جریمه انتشار سال‌های مختلف روندی کاهشی را دنبال می‌کند. این کاهش تقریباً در همه سناریوها ثابت است، اما مقدار آن در سناریوی خرس در مقایسه با سناریوهای دیگر بیشتر است. به دنبال آن به ترتیب سناریوهای یوزپلنگ، کفتار و کاراکال قرار می‌گیرند. سرمایه‌گذاری اقتصادی قابل‌توجهی در سال ۲۰۲۵ برای تغییرات اساسی در سیستم انرژی مورد نیاز است. این سرمایه‌گذاری اساسی باعث کاهش هزینه‌ها در سال‌های بعدی خواهد شد. اما نکته قابل توجه این است که در سناریوی یوزپلنگ به دلیل وجود اهداف کاهش انتشار در تمام سال‌های تا سال ۲۰۵۰ با هدف انتشار خالص صفر، سرمایه‌گذاری بیشتری مورد نیاز است. منابع مالی این سرمایه‌گذاری با توجه به کاهش اثرات تغییر اقلیم در سطح جهان می‌تواند از طریق کشورهای توسعه یافته تامین شود. همچنین می‌توان اشاره کرد که این کاهش انتشار حریصانه بوده و برای دستیابی به آن هزینه بسیار زیادی به سیستم تحمیل شده است. تأثیر سلامتی در سناریوی کاراکال در مقایسه با سایر سناریوها با سرعت بیشتری در حال کاهش است، به جز در سال ۲۰۵۰ که هدف انتشار صفر باعث پیش افتادن سناریوی یوزپلنگ شده است. این روند نشان می‌دهد که اثرات سلامتی ممکن است حتی با اجرای مالیات کربن، مانند سناریوی خرس، کاهش نیابد. بنابراین، تغییرات رفتاری، که به طور برجسته در سناریوی کاراکال نشان داده شده است، موثرترین اقدام به نظر می‌رسد. با در نظر گرفتن مالیات کربن بهینه، ترکیب فناوری‌های منتخب تغییر می‌نماید. برای اتوبوس، دو فناوری *BUSELE* و *BUSGAS* گزینه‌های اصلی در مدل هستند. *BUSGAS* سهم بیشتری دارد به جز در سناریوی کفتار که در آن *BUSELE* سهم بیشتری را به خود اختصاص داده است. این با توجه به قیمت پایین‌تر برق در این سناریو قابل درک است. برای خودروی سواری، حیاتی‌ترین انتخاب مدل حرکت به سمت *CARCNG* است و همین امر در مورد تاکسی نیز صدق می‌کند. انتخاب مدل برای *MOT* در همه سناریوها *MOTELE* است. در تمام سناریوها برای سرمایه‌گذاری ۶۵ درصد *COLEVA* و ۹ درصد توسط *COLFAN* ارائه می‌شود. سهم باقی‌مانده بین *COLACI*، *COLACN*، و *COLACH* توزیع شده است. برای پخت و پز از در همه سناریوها از *STONGA* استفاده می‌شود به جز در سناریوی کفتار که در آن ظرفیت باقیمانده *STOELE* به دلیل قیمت پایین‌تر برق استفاده می‌شود. در سناریوهای یوزپلنگ، کاراکال و خرس، گرمایش توسط *HETPAK* به ترتیب ۹۰، ۱۰۰ و ۵۱ درصد ارائه می‌شود. با این حال، در سناریوی کفتار ۷۶ درصد از گرمایش توسط *HETELE* تامین می‌گردد. مهمترین فناوری برای تامین آب گرم نیز *WHENGA* شناخته شده است. انتخاب مدل برای فراوری زباله در همه سناریوها *LANFIE* است به جز سناریوی یوزپلنگ، که در آن از *MSWINC* برای دستیابی به هدف انتشار خالص صفر استفاده می‌شود. عرضه گرمایش در صنعت نیز عمدتاً با گاز طبیعی صورت گرفته است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مطالعه یک مدل یکپارچه انتشار-سلامت-انرژی با ساختار دوسطحی توسعه داده است که قادر است قیمت بهینه کربن را با هدف جبران هزینه‌های سلامت و اجرای سیاست‌های اقلیمی تعیین کند. دستاورد اصلی مدل، برآورد مقدار بهینه قیمت کربن در محدوده ۳ تا ۸

دلار به ازای هر تن در سناریوها و سالهای مختلف است. این اعداد در محدوده بازارهای کربن مشابه نیز هستند. مزیت کلیدی مدل نسبت به رویکردهای سنتی، لحاظ همزمان جنبه‌های اقتصادی و بهداشتی در یک ساختار بهینه‌سازی دوسطحی است. بر اساس نتایج، روند صعودی قیمت کربن در بلندمدت قابل انتظار است، که از منظر سیاست‌گذاری، اعمال تدریجی و افزایشی مالیات کربن می‌تواند اثربخش باشد. پیشنهاد می‌شود از این چارچوب مدل‌سازی در سیاست‌گذاری‌های اقلیمی و انرژی در مقیاس شهری و ملی بهره گرفته شود. همچنین، پژوهش‌های آتی می‌توانند با افزودن متغیرهایی همچون محدودیت منابع طبیعی، عدالت محیط‌زیستی و کیفیت اکوسیستم‌ها، به توسعه بیشتر مدل کمک کنند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

علی اکبر رضازاده: توسعه مدل مفهومی، انجام مدل‌سازی و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله
اکرم عوامی: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران (شماره گرنت: 4014105) و دانشگاه صنعتی شریف انجام شد.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

حجت، یوسف؛ و زینتی، سیدرسول. (۱۴۰۰). سیاهه انتشار آلاینده‌های هوا ناشی از منابع انسان‌ساز در کلان‌شهر تهران، شامل تدوین و ارزیابی سناریوهای کاهش انتشار برای سال مبنای ۱۳۹۶. مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

References

- Afsari Mamaghani, F., Omidvar, B., Avami, A., & Nabi-Bidhendi, G. (2023). An optimal integrated power and water supply planning model considering Water-Energy-Emission nexus. *Energy Conversion and Management*, 277, 116595. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116595>
- Alizadeh, S., Rezazadeh, A. A., & Avami, A. (2023). A cutting-edge tool for sustainable environmental management through life cycle assessment, under review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*.
- Alizadeh, S., Vali, F., Vatani, Z., & Avami, A. (2023). Sustainable analysis of Waste-to-Energy systems in cities by eco-efficiency assessment using DEA approach: A case study of Iran's municipalities. *Sustainable Cities and Society*, 98, 104825. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104825>
- Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*. Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-268-1>
- Carleton, T. A., Hsiang, S. M., Kopp, R. E., Mccusker, K. E., & Rising, J. (2021). *VALUING THE GLOBAL MORTALITY CONSEQUENCES OF CLIMATE CHANGE ACCOUNTING FOR ADAPTATION COSTS AND BENEFITS*.
- DOE(Iran). (2015). *Islamic Republic of Iran Intended Nationally Determined Contribution*. https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/UNFCCC_docs/indc_iran_final_text.pdf
- Emmerling, J., Drouet, L., van der Wijst, K. I., van Vuuren, D., Bosetti, V., & Tavoni, M. (2019). The role of the discount rate for emission pathways and negative emissions. *Environmental Research Letters*, 14(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3cc9>
- Erfan Doraki, M., Avami, A., Boroushaki, M., & Amini, Z. (2024). Agent-Based Modeling for Sustainable Urban Passenger Vehicle Mobility: A Case of Tehran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 135, 104380. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104380>
- Fremstad, A., & Paul, M. (2019). The Impact of a Carbon Tax on Inequality. *Ecological Economics*, 163, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.04.016>
- Goedkoop, M., & Huijbregts, M. (2013). *ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises hamonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. 4–20.
- Hojjat, Y., & Zinti, S. (2021). *The list of air pollutant emissions caused by man-made sources in the metropolis of Tehran, including compilation and evaluation of emission reduction scenarios for the base year of 2017 (in Persian)*. Tehran University Publishing Institute.
- Hollander, A., & et al. (2017). *ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*.
- InternationalEnergyAgency. (2022). *World Energy Outlook 2022*.
- Lin, B., & Li, X. (2011). The effect of carbon tax on per capita CO2 emissions. *Energy Policy*, 39(9), 5137–5146. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.050>
- Manta, A. G., Doran, N. M., Bădîrcea, R. M., Badareu, G., & Țăran, A. M. (2023). Does the implementation of a Pigouvian tax be considered an effective approach to address climate change mitigation? *Economic Analysis and Policy*, 80, 1719–1731. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2023.11.002>
- Mesrzade, P., Dehghanian, F., & Ghiami, Y. (2023). A Bilevel Model for Carbon Pricing in a Green Supply Chain Considering Price and Carbon-Sensitive Demand. *Sustainability*, 15(24), 16563. <https://doi.org/10.3390/su152416563>
- Nemet, G. F., Holloway, T., & Meier, P. (2010). Implications of incorporating air-quality co-benefits into climate change policymaking. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014007>
- Rezazadeh, A. A., Alizadeh, S., Avami, A., & Kianbakhsh, A. (2022). Integrated analysis of energy-pollution-health nexus for sustainable energy planning. *Journal of Cleaner Production*, 131824. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131824>
- Rezazadeh, A. A., & Avami, A. (2024). An integrated policy approach for sustainable decarbonization pathways of energy system in a city under climate change scenarios. *Energy Policy*, 195, 114394. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114394>
- Rezazadeh, A. A., Avami, A., Mashayekhi, M., & Kianbakhsh, A. (2022). Assessing the contribution of different sources in atmospheric dispersion of PM2.5 and related health impact in a region of Qazvin, Iran. *Air Quality, Atmosphere & Health*. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01163-6>
- Rezazadeh, A. A., Avami, A., & Soleymani Baghshah, M. (2024). Climatic scenario-based integrated recurrent ensemble model for energy demand forecasting. *Energy and Buildings*, 114103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114103>
- Rezazadeh, A., & Avami, A. (2024). An Integrated Policy Approach for Sustainable Decarbonization Pathways of

- Energy System in a City under Climate Change Scenarios. *Energy Policy*.
- Rezazadeh, A., Avami, A., & Hassanvand, M. S. (2025). Energy Planning in Urban Areas under Climate Change: An Integrated Energy-Emission-Health Optimization Model (under review). *Energy Reports*.
- Ricke, K., Drouet, L., Caldeira, K., & Tavoni, M. (2018). Country-level social cost of carbon. *Nature Climate Change*, 8(10), 895–900. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0282-y>
- Salgas, A., Lafforgue, G., Planès, T., & Delbecq, S. (2025). Enhanced marginal abatement cost curves for analysing and designing aviation decarbonisation scenarios. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 146, 104836. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104836>
- Shahbazi, A., Avami, A., Moeini-Aghtaie, M., & Tavassoti, H. (2024). Optimum carbon tax rate for emission targets of electricity generation system by life cycle techno-economic-environmental optimization model. *Renewable Energy*, 237, 121877. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121877>
- Shen, Y., Su, Z.-W., Malik, M. Y., Umar, M., Khan, Z., & Khan, M. (2021). Does green investment, financial development and natural resources rent limit carbon emissions? A provincial panel analysis of China. *Science of The Total Environment*, 755, 142538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142538>
- Stott, R. (1999). *The World Bank - Sindh Solar Energy Project (P159712)*. British Medical Journal.
- US EPA, O. (2024). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors*. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>
- Watch, C. (2022). *Greenhouse Gas Emissions*. https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2019&start_year=1990
- West, J. J., Smith, S. J., Silva, R. A., Naik, V., Zhang, Y., Adelman, Z., Fry, M. M., Anenberg, S., Horowitz, L. W., & Lamarque, J.-F. (2013). Co-benefits of mitigating global greenhouse gas emissions for future air quality and human health. *Nature Climate Change*, 3(10), 885–889. <https://doi.org/10.1038/nclimate2009>
- World Bank. (2025). *Carbon Pricing Dashboard | Up-to-date overview of carbon pricing initiatives*. <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>
- Xiong, Z., Wang, L., Jiang, C., Zhou, S., & Li, Y. (2025). Bi-Level Low-Carbon Optimal Operation Model of Multi-Energy Aggregator in Energy and Flexibility Market. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 61(3), 4755–4767. <https://doi.org/10.1109/TIA.2025.3542724>
- Xu, H., Pan, X., Li, J., Feng, S., & Guo, S. (2023). Comparing the impacts of carbon tax and carbon emission trading, which regulation is more effective? *Journal of Environmental Management*, 330, 117156. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117156>