Journal of Environmental Studies
Vol. 48, No. 2, Summer 2022

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

Emissions of Fluorinated Greenhouse Gases- Mitigation Options to be Implemented in National Development Policies

Document Type
Research Paper

Received
Avril 22, 2022

Accepted
July 2, 2022

Mohammad Hassan Panjeshahi, Nassim Tahouni*

School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

DOI: 10.22059/jes.2022.341497.1008307

Abstract

This study aims to identify sources of fluorinated greenhouse gases and evaluate the capacity needs assessment for consideration of these gases in the national GHG inventory and climate action planning for the "Climate Promise" project. These GHGs have a shorter atmospheric lifetime compared to CO_2 but a high global warming potential and can warm the earth faster compared to CO_2. The first stage is to identify the main sources of emissions by the mentioned greenhouse gases and collect the necessary information. The second stage is to estimate the production and consumption of these gases in the country. Depending on the data, including import, production, and consumption of gases or sales information of the devices producing these gases, we can use the Tier1 or Tier2 method to calculate the amount of emissions. Greenhouse gas emissions in 2019 were estimated at 62.3 million tons of CO_2 equivalent for HFC gases, 180 Gg of CO_2 equivalent for SF_6 gas, and 1,130 Gg of CO_2 equivalent for PFC gases. There is no information to estimate the NF_3 emissions. In the last stage, solutions to reduce emissions of these gases are listed to be implemented in national development policies. The main achievement of this research is empowering the government to count these new greenhouse gases.

Key Words: Fluorinated greenhouse gases emissions, Hydrofluorocarbons (HFCs), Sulfur hexafluoride (SF_6), Perfluorocarbons (PFCs), Nitrogen trifluoride (NF_3)

* Corresponding Author: Email: ntahuni@ut.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

In line with the Article 12 of the United Nations Framework Convention on Climate Change, which states that each country party shall communicate to the Conference of the Parties a national inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of all GHGs, to the extent its capacities permit, using comparable methodologies to be promoted and agreed upon by the Conference of the Parties. There is growing recognition within the scientific and policy communities that efforts to address climate change should focus on substantially reducing carbon dioxide emissions and on near-term actions to reduce those climate pollutants that remain in the atmosphere for much shorter periods. Unlike carbon dioxide, short-lived climate pollutants have a shorter atmospheric lifetime but have a high global warming potential, meaning they can warm the Earth faster compared to carbon dioxide. The objective of the current research is to estimate fluorinated GHGs (Hydrofluorocarbons (HFCs), Sulfur hexafluoride (SF_6), Perfluorocarbons (PFCs), Nitrogen trifluoride (NF_3)) emissions in the national GHG inventory and climate action planning.

Table 1 reports the CO_2-equivalent emissions related to fluorinated GHGs for Annex I Countries in 2018. The highest emissions are from HFCs, so increasing their consumption is a concern, and counting these emissions in emissions inventories and climate change operations plan is essential.

Under the Montreal Protocol (1987), the developed countries pledged to end the production and consumption of ozone-depleting substances (CFCs, haloes, and carbon tetrachloride) in 2000 and support the developing countries financially and technically. As a result of this Protocol, HFC gases became more common in equipment as an alternative to ozone-depleting substances. Then in 1997, under a protocol known as Kyoto, the industrialized nations pledged to reduce emissions of six gases, including HFC.

Table 1. CO_2 equivalent emissions related to fluorinated GHGs – Annex I Countries - 2018

Gas	Emission - CO_2 equivalent (Picogram)
HFCs	379,475
SF_6	16,941
PFCs	15,720
NF_3	980

Table 2 compares the GWP-100 years for fluorinated gases with conventional GHGs.Therefore increasing the consumption of F-gases is a matter of concern, and it is necessary to consider these gases for national emission inventory and climate action planning.

Table 2. Examples of emission metric values

Gas	GWP (for 100 years)	Life Time (y)
CO_2	1	*
CH_4	28	12.4
HFC-152a	138	1.5
N_2O	265	121
CF_4	6,630	50,000
NF_3	17,200	740
SF_6	23,500	3,200
*No single lifetime can be given for CO_2		

Main Sources of fluorinated GHG emission

HFC gases are primarily produced for use in refrigeration and air conditioning and heat pump systems (RACHP). Other applications include the production of foam insulation, aerosols, fire protection systems and solvents. Figure 1 shows the contribution of GHG emissions due to HFC consumptions in 2015.

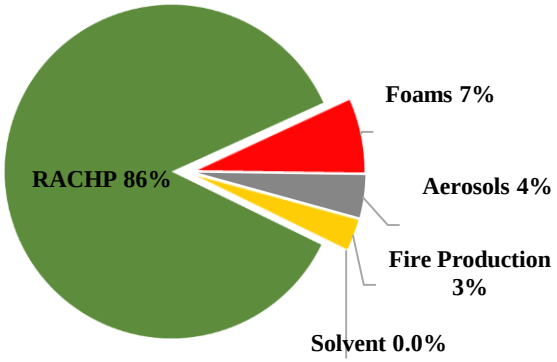


Figure 1: Markets using HFCs, % of tonnes CO_2 in the world in 2015

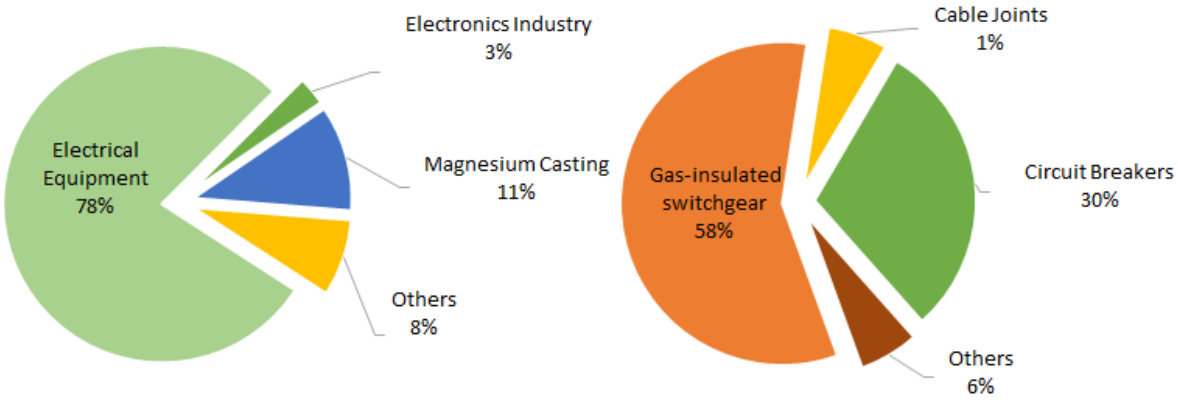


Figure 2: The share of CO_2 equivalent emissions related to different consumer sectors of SF_6 and for various electrical equipment in the world in 2018

SF_6 gas is used in electrical equipment, magnesium casting, electronics industry, and other applications; the highest consumption is related to electrical equipment. Figure 2 indicates the share of carbon dioxide equivalent emissions related to different consumer sectors of SF_6 and, in particular various electrical equipment in the world in 2018. The main sources of PFC emissions are the aluminum industry and the electronics industry. The largest share of emissions is related to the primary aluminum production sector and electronics industry (35%).

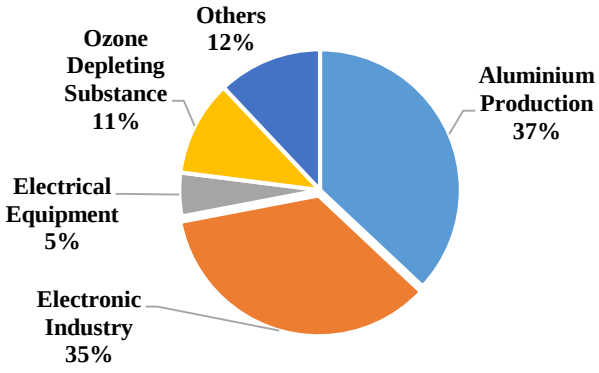


Figure 3: The share of CO_2 equivalent emissions related to different sources of PFC in the world in 2018

Asia currently has the most significant share in NF_3 gas consumption due to the development of the semiconductor industry in Japan, South Korea, and China. It is expected to increase demands for flat panel displays in markets such as China and India, so NF_3 consumption will increase. In Europe, government supports the semiconductor and electronics industries to compete with Asian and North American markets, which is expected to increase NF_3 consumption

Emission Inventory Estimation

Using IPCC Guidelines for national GHG inventories, the emission of HFCs, SF_6, PFCs and NF_3 is calculated in Iran. According to the available information, one of the methods, Tier 1 or Tier 2, can be used.

There are seven groups of HFC consumers in Iran which are unitary air conditioning, chillers, mobile air conditioning, domestic refrigeration, commercial refrigeration, industrial refrigeration, and transport refrigeration. The GHG emission for the Iranian refrigeration and air conditioning sector was 49.5 MtCO2eq in 2015. It is estimated to be 62.35 $MtCO_2eq$ in 2019 using Tier1. The unity air conditioning accounts for 39% of total emissions. The amount of SF_6 gas emissions due to electricity substations in the country in 2019 is estimated to be 180 $GgCO_2eq$ using Tier1. Emissions of PFC gases (including CF_4 and C_2F_6) owing to aluminum production are estimated to be 1130 $GgCO_2eq$ using Tier1. According to the available information, the consumption and emission of NF_3 gas in the country are expected to be zero.

Conclusion

The consideration of new GHG gases in the national GHG inventory was addressed. Challenges for completing the new GHG emissions inventory can be classified into four categories. Lack of access to data and their reliability can be considered as one of the main issues in preparing the GHG inventory. There is currently no process for recording, collecting, and managing fluorinated gas data in Iran. Many of the available data are unreliable due to poor collection and management. In addition, comprehensive data collection is challenging. Due to the lack of access to all emission sources data, including small and informal industry data, significant gaps are created in the accuracy of the data. Emission factors used for the calculation of the fluorinated GHGs emissions are the default values of IPCC, and national emission factors have not been prepared in Iran. The use of these default values is a factor in creating uncertainty in calculations. Another challenge is the limited technical capacity of specialists and staffs. There are no plans for continues training. Also, financial support is needed to improve the quantity and quality of the national GHG inventory.

محیط‌شناسی، دورهٔ ۴۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۱، صفحهٔ ۲۴۹ – ۲۷۸

بررسی انتشار گازهای گلخانه‌ای حاوی فلوئور در ایران– راهکارهای پیشنهادی کاهش برای استفاده در سیاست‌های توسعه‌ای کشور

محمدحسن پنجه‌شاهی، نسیم طاهونی*

دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۱/۲/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۴/۱۱

چکیده

هدف تحقیق حاضر، شناسایی منابع تولید گازهای گلخانه‌ای فلوئوردار، تهیه موجودی اولیه انتشار و ارزیابی ظرفیت‌های موردنیاز برای احصاء این گازها در فهرست موجودی گازهای گلخانه‌ای کشور به منظور برنامه‌ریزی اقدامات تغییر اقلیم در ایران ذیل پروژه پایداری اقلیم سازمان ملل متحد می‌باشد. مرحله اول شناسایی منابع اصلی انتشار آلاینده‌ها توسط گازهای گلخانه‌ای مذکور و جمع‌آوری اطلاعات لازم و مرحله دوم تخمین میزان تولید و مصرف این گازها در کشور است. بر حسب اینکه چه نوع اطلاعاتی اعم از واردات، میزان تولید و مصرف این گازها و یا اطلاعات فروش دستگاه‌های تولیدکننده این گازها به صورت جداگانه در اختیار باشد، از یکی از روش‌های سطح یک یا سطح دو برای محاسبه میزان انتشار استفاده شده است. مقدار انتشار این گازها در سال ۲۰۱۹، ۶۲/۳ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن برای گازهای هیدروفلوئورکربن، ۱۸۰ گیگاگرم معادل دی‌اکسیدکربن برای گاز هگزا فلوراید گوگرد و ۱۱۳۰ گیگاگرم معادل دی‌اکسیدکربن برای گازهای پرفلوئورکربن براورد شد. تخمین میزان انتشار گاز تری فلوئورید نیتروژن با اطلاعات موجود امکان‌پذیر نبود. در مرحله آخر راهکارهایی برای کاهش انتشار این گازها ارائه شده تا در سیاست‌های توسعه‌ای کشور در تغییر انتشارات در آینده لحاظ شود. دستاورد اصلی این تحقیق توانمندسازی کشور برای احصاء این گازهای جدید گلخانه‌ای می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: انتشار گازهای گلخانه‌ای فلوئوردار، هیدروفلوئورکربن‌ها، هگزا فلوراید گوگرد، پرفلوئورکربن‌ها، تری فلوئورید نیتروژن

سرآغاز

مطابق با ماده ۱۲ کنوانسیون سازمان ملل متحد در مورد تغییرات اقلیم، هر کشور عضو باید میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع نشر ناشی از دخالت انسان در طبیعت را اعلام کند. این امر باید با توجه به ظرفیت‌های هر کشور و با استفاده از روش‌های قابل مقایسه‌ای که مورد توافق سازمان ملل است، انجام می‌گیرد. تلاش برای رفع تغییرات آب‌وهوایی تنها به کاهش قابل توجه انتشار دی‌اکسیدکربن، معطوف نمی‌شود. بلکه اقدام برای کاهش آلاینده‌های آب و هوایی که برای مدت زمان کوتاه‌تری در جو باقی می‌مانند، نیز مورد توجه مجامع علمی و سیاسی است. برخلاف دی‌اکسیدکربن، آلاینده‌های آب و هوایی با عمر کوتاه مدت، زمان کمتری در جو باقی می‌مانند اما از پتانسیل گرمایش جهانی بالایی برخوردار هستند، به این معنی که می‌توانند

* نویسنده مسئول Email: ntahuni@ut.ac.ir

DOI: 10.22059/jes.2022.341497.1008307
DOR: 20.1001.1.10258620.1401.48.2.5.0

زمین را در مقایسه با دی‌اکسیدکربن سریع‌تر گرم کنند. هدف تحقیق حاضر برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای جدید حاوی فلوئور شامل هیدروفلوئورکربن‌ها (HFCs)[۱]، هگزا فلورایدگوگرد (SF_6)[۲]، پرفلوئورکربن‌ها (PFCs)[۳] و تری فلوئورید نیتروژن (NF_3)[۴] در فهرست موجودی گازهای گلخانه‌ای و برنامه‌ریزی اقدامات اقلیمی کشور است. جدول ۱ انتشارات گازهای گلخانه‌ای حاوی فلوئور در کشورهای ضمیمه یک در سال ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد (UNFCCC، ۲۰۲۱). همان‌طور که مشخص است، بیشترین میزان انتشار مربوط به گازهای HFC است و بنابراین افزایش مصرف آن‌ها نگران‌کننده بوده و احصاء این گازها در موجودی انتشار و برنامه‌های عملیاتی تغییر اقلیم کشورها ضرورت دارد. طبق پروتکل مونترال (۱۹۸۷)، کشورهای توسعه‌یافته تعهد کردند که به تولید و مصرف مواد مخرب لایه اوزن (کلروفلوئوروکربنها، هالون و تتراکلریدکربن) در سال ۲۰۰۰ میلادی خاتمه دهند و کشورهای در حال توسعه را در این راستا از نظر مالی و فنی حمایت کنند. همچنین مقرر شده است که کشورهای در حال توسعه نیز با ۱۰ سال تأخیر یعنی در سال ۲۰۱۰ میلادی به مصرف مواد مذکور پایان دهند. ایران نیز از سال ۱۳۶۸ به این پیمان ملحق شده است. در نتیجه این پیمان، استفاده از گازهای HFC به عنوان جایگزینی برای مواد مخرب لایه اوزن در تجهیزات رایج‌تر شد. پس از آن در سال ۱۹۹۷ طی پیمانی معروف به کیوتو کشورهای صنعتی متعهد شدند که آلاینده‌های شش گاز که HFC نیز جزو آن‌ها می‌باشد را نیز به طور همه‌جانبه پایین آورند. میزان انتشار ناشی از گازهای HFC در جهان مطابق با سناریوی پایه در سال ۲۰۵۰، ۸/۵ گیگاتن معادل دی‌اکسیدکربن پیش‌بینی شده است. مطابق اصلاحیه کیگالی، میزان انتشار گازهای HFC تا سال ۲۱۰۰ باید به کمتر از یک گیگاتن معادل دی‌اکسیدکربن در سال کاهش پیدا کند (Ozone Depletion، ۲۰۱۸).

جدول ۲ میزان پتانسیل گرمایش جهانی در مقیاس

جدول ۱- میزان انتشارات گازهای گلخانه‌ای حاوی فلوئور در کشورهای ضمیمه یک، ۲۰۱۸ (UNFCCC، ۲۰۱۸)

گاز	میزان انتشار (معادل پیکوگرم دی‌اکسیدکربن)
هیدروفلوئورکربن‌ها	۳۷۹،۴۷۵
هگزا فلوراید گوگرد	۱۶،۹۴۱
پرفلوئورکربن‌ها	۱۵،۷۲۰
تری فلوئورید نیتروژن	۹۸۰

زمانی ۱۰۰ ساله گازهای فلوئوردار و طول عمر آنها را در مقایسه با گازهای متداول گلخانه‌ای نشان می‌دهد (IPCC، ۲۰۱۴). میزان انتشار گاز هگزا فلوراید گوگرد نسبت به دی‌اکسیدکربن و متان کمتر است؛ اما پتانسیل گرمایش جهانی این گاز ۲۳۵۰۰ برابر پتانسیل آلایندگی دی‌اکسیدکربن است و ماندگاری بالایی در جو برابر با ۳۲۰۰ سال دارد؛ بنابراین تمامی گاز منتشرشده در جو زمین باقی است و با تداوم مصرف، مقدار آن همواره افزایش می‌یابد. گازهای CF_4 و C_2F_6 و C_3F_8 از مهم‌ترین گازهای موجود در گروه پرفلوئورکربن‌ها هستند که به علت داشتن پتانسیل گرمایش جهانی بالا - به ترتیب ۶۶۳۰، ۱۱۱۰۰ و ۸۹۰۰ برابر بیشتر از دی‌اکسیدکربن - اثرات زیادی بر گرم شدن کره زمین دارند (IPCC، ۲۰۰۶). گاز NF_3 جزو گازهای گلخانه‌ای است که تا مدتها ناشناخته بوده است. این گاز یک ماده شیمیایی مصنوعی است که در مقادیر صنعتی تولید می‌شود و در هیچ دسته‌بندی از پروتکل کیوتو و یا گزارش ملی تحت چارچوب پیمان‌نامه سازمان ملل درباره تغییرات اقلیمی (UNFCCC) نمی‌باشد و مشاهداتی که فراوانی جوی آن را مستندسازی کند وجود ندارد، زیرا اهمیت بالقوه این گاز به‌عنوان یک گاز گلخانه‌ای تا سال ۲۰۰۱ ارزیابی نشده است (Prather و Hsu، ۲۰۰۸). امروزه روش‌های جدید اندازه‌گیری، غلظت NF_3 موجود در جو را بسیار بالاتر از حد انتظار نشان می‌دهند که می‌تواند تا حدی به این واقعیت نسبت داده شود که تلفات صنعتی این گاز به غلط ناچیز لحاظ شده بوده است. میزان انتشار این گاز به‌سرعت

در حال افزایش است به‌طوری‌که تولید این گاز در بخش صنعت تنها بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۷ به میزان ۴۰ برابر افزایش پیدا کرده است (ghgprotocol.org). پتانسیل گرمایش جهانی ۱۰۰ ساله این گاز ۱۷۲۰۰ می‌باشد که پس از گاز SF_6 بزرگ‌ترین پتانسیل گرمایش جهانی را داراست. همچنین این گاز طول عمری برابر با ۷۴۰ سال دارد. درنتیجه در حال حاضر این گاز یکی از عوامل مؤثر در تغییرات آب و هوا محسوب می‌شود و به همین دلیل باید در موجودی ملی تحت چارچوب پیمان‌نامه سازمان ملل درباره تغییرات اقلیمی گنجانده شود.

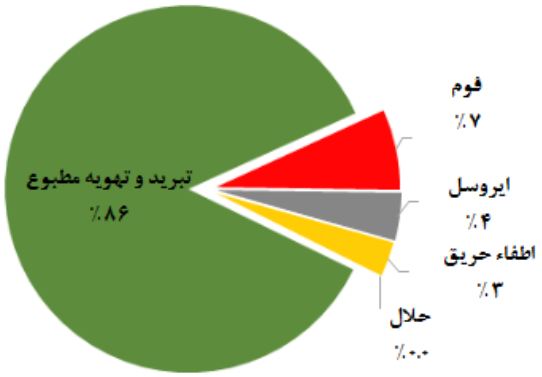
جدول ۲- پتانسیل گرمایش جهانی گازهای حاوی فلوئور در مقایسه با سایر گازهای گلخانه‌ای (IPCC، ۲۰۱۴)

گاز	پتانسیل گرمایش جهانی در مقیاس ۱۰۰ ساله	طول عمر (سال)
دی‌اکسیدکربن	۱	صدها سال*
متان	۲۸	۱۲/۴
HFC-152a	۱۳۸	۱/۵
دی نیتروژن مونوکسید (N_2O)	۲۶۵	۱۲۱
CF_4 (از گازهای پرفلوئورکربن)	۶۶۳۰	۵۰،۰۰۰
تری فلوئورید نیتروژن	۱۷۲۰۰	۷۴۰
هگزا فلوراید گوگرد	۲۳۵۰۰	۳۲۰۰
* عدد یکسانی در مراجع گزارش نشده است.		

منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای جدید

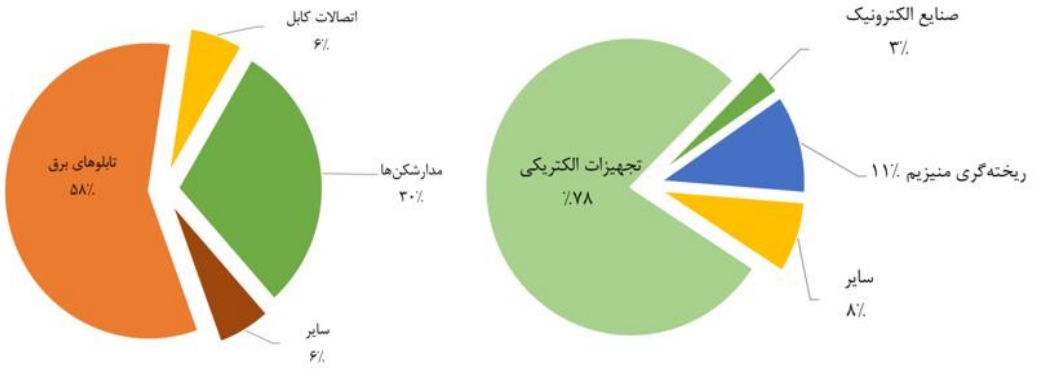
گازهای HFC برخلاف اکثر گازهای گلخانه‌ای تنها محصول نامطلوب و جانبی برخی از فرایندها نیستند، بلکه به عمد و با دست بشر نیز ساخته می‌شوند. آن‌ها در درجه اول برای استفاده در سامانه‌های تبرید و تهویه مطبوع هوا تولید می‌شوند. از کاربردهای دیگر آن‌ها می‌توان به تولید فوم‌های عایق، آیروسل، اطفاء حریق و با کاربردهای جزئی به عنوان حلال اشاره کرد. انتشارات ممکن است در زمان تولید، تعمیر و نگهداری و اسقاط تجهیزات رخ دهند. شکل ۱ سهم انتشارات گازهای HFC برای کاربردهای مختلف را در جهان و برای سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد (UNEP، ۲۰۱۵).

گاز SF_6 در تجهیزات الکتریکی، ریخته‌گری منیزیم، صنایع الکترونیک و سایر موارد مصرف دارد؛ که بیشترین مصرف مربوط به تجهیزات الکتریکی است. شکل ۲ سهم انتشار معادل دی‌اکسیدکربن مربوط به بخش‌های مختلف مصرف‌کننده SF_6 و به‌طور ویژه تجهیزات الکتریکی مختلف در جهان در سال ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد (UNFCCC، ۲۰۲۱).

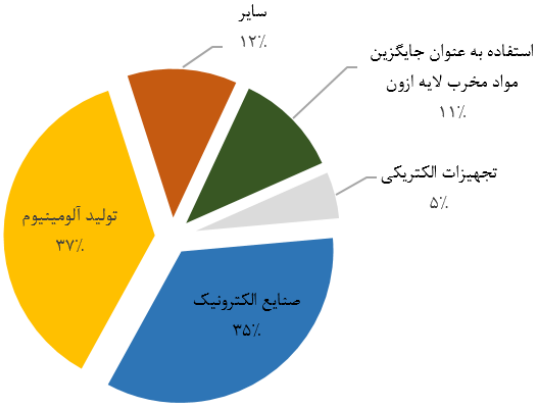


شکل ۱- سهم انتشارات معادل دی‌اکسیدکربن در بخش‌های مختلف مصرف‌کننده HFC در جهان در سال ۲۰۱۵ (UNEP، ۲۰۱۵)

شکل ۳ سهم انتشارات معادل دی‌اکسیدکربن گازهای PFC به تفکیک کاربرد در کشورهای ضمیمه یک در سال ۲۰۱۸ را نمایش می‌دهد (UNFCCC، ۲۰۲۱). با توجه به استفاده از فناوری‌های جدید در تولید آلومینیوم در جهان، سهم انتشار از این منبع نسبت به گذشته کاهش یافته است؛ اما هنوز بزرگ‌ترین سهم انتشار این گازها مربوط به صنایع آلومینیوم است.



شکل ۲- سهم انتشارات معادل دی‌اکسیدکربن در بخش‌های مختلف مصرف‌کننده SF6 و به‌طور خاص تجهیزات الکتریکی در جهان در سال ۲۰۱۸ (UNFCCC، ۲۰۲۱)



شکل ۳- سهم انتشارات معادل دی‌اکسیدکربن گازهای PFC در کشورهای ضمیمه یک به تفکیک کاربرد در سال ۲۰۱۸ (UNFCCC، ۲۰۲۱)

انتشار گاز NF_3 ناشی از صنایع الکترونیک و فرآیند تولید این گاز است. انتشار ناشی از فرآیند تولید در سال‌های اخیر کاهش یافته است. اما توسعه صنایع الکترونیک و افزایش تقاضای جهانی برای صفحه نمایش‌های مسطح، تلویزیون‌های LCD و سلول‌های فتوولتائیک در سال‌های اخیر منجر به افزایش مصرف گاز NF_3 و افزایش انتشار شده است. آمار نشان می‌دهد که در محدوده سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ میزان تولید گاز NF_3 در کشورهای ضمیمه یک در هر سال به‌طور متوسط ۱۵ الی ۱۷ درصد افزایش یافته است. در حال حاضر آسیا بیشترین نقش را در مصرف این گاز با توجه به توسعه صنعت نیمه‌هادی در کشورهای ژاپن، کره جنوبی و چین دارد. همچنین انتظار می‌رود تقاضا برای صفحه نمایش‌های مسطح در بازارهایی مانند چین و هند و به تناسب آن میزان مصرف این گاز افزایش یابد. در اروپا نیز پیش‌بینی می‌شود، حمایت دولت‌ها از صنایع نیمه‌هادی و الکترونیک با هدف رقابت با بازارهای آسیا و آمریکای شمالی، منجر به افزایش مصرف گاز NF_3 شود (Martin-Torrest، ۲۰۲۰).

بررسی بازار مصرف گاز NF_3 در آمریکای شمالی از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که ۵۳ درصد رشد در استفاده از این گاز در تجهیزات الکترونیکی تا سال ۲۰۲۴ تخمین زده شده است. این میزان برای کاربردهای مختلف گاز از جمله استفاده در سلول‌های خورشیدی، صفحه نمایش مسطح و نیمه‌هادی‌ها است. نیمه‌هادی‌ها ۴۴/۲ درصد از کل این بازار مصرف در سال ۲۰۲۴ را به خود اختصاص داده‌اند. بررسی بازار مصرف NF_3 در آسیا و اقیانوسیه نشان می‌دهد که این منطقه بیشترین تقاضا را برای NF_3 به میزان ۹/۹ کیلوتن در سال ۲۰۱۳ داشته است. همچنین سریع‌ترین رشد در بازار NF_3 به میزان ۱۲/۹ درصد از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ در این منطقه مورد انتظار بوده است. در میان کشورهای ضمیمه یک انتشار ناشی از فرایند تولید تنها مربوط به کشور ژاپن است، که البته این انتشار در سال‌های اخیر کاهش پیدا کرده است (NF_3 و F_2، ۲۰۱۵).

روش محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای جدید

محاسبه میزان انتشار گازهای HFC

برای محاسبه میزان انتشار مستقیم گازهای HFC در تجهیزات تبرید و تهویه مطبوع (به عنوان منشأ اصلی انتشار این گازها)، می‌توان از دو روش سطح یک (Tier1) و سطح دو (Tier2) استفاده نمود.

در روش سطح یک از داده‌های تولید، مصرف، صادرات و واردات این گازها به صورت کلی استفاده می‌شود. مبنای محاسبه انتشار در این روش فرضیاتی است که با مطالعه تجربیات مصرف و ذخیره مبردها در کشورهای مختلف حاصل شده است. این فرضیات عبارتند از (IPCC، ۲۰۰۶): اولین سرویس تجهیز حداقل ۳ سال پس از نصب آن انجام می‌شود، سهم انتشار تجهیزات موجود به طور متوسط ۱۵ درصد از کل انتشار سالانه ناشی از بخش تبرید و تهویه مطبوع است، دو سوم از مبردها در سرویس تجهیزات موجود و یک سوم از آن‌ها در شارژ تجهیزات جدید استفاده می‌شود، متوسط طول عمر تجهیزات ۱۵ سال است و جایگزینی مبرد جدید طی دوره ۱۰ ساله انجام می‌شود. در روش سطح یک با استفاده از داده‌های تولید، صادرات و واردات، میزان کل مبرد مصرفی در هر سال محاسبه می‌شود. همچنین با فرضیات روش سطح یک محاسبات برگشتی انجام می‌شود و میزان تولید، صادرات و واردات در سال‌های پیشین که داده‌های آن موجود نیست، نیز تخمین زده شده و میزان مبرد مصرفی حاصل می‌شود. میزان مبرد در تجهیزات موجود در هر سال از کسر میزان مبرد در تجهیزات اسقاطی و میزان انتشار از مجموع مبرد مصرفی، در سال‌های پیشین محاسبه می‌شود. انتشار ناشی از تجهیزات موجود با ضریب انتشار فرضی حاصل می‌شود. همچنین میزان مبرد در تجهیزات اسقاطی نیز با اعمال طول عمر تجهیز، مبرد موجود در تجهیزات و میزان مصرف مبرد در سرویس تجهیزات طی سال‌های پیشین حاصل می‌شود. انتشار ناشی از تجهیزات اسقاطی با اعمال میزان بازیابی محاسبه می‌شود. میزان انتشار کل برابر با مجموع انتشار در تجهیزات موجود و اسقاطی در هر سال است. محاسبات روش سطح یک در نرم‌افزارهای صفحه‌گسترده یا نرم‌افزارهای ویژه چون IPCC Inventory Software (ipcc-nggip، ۲۰۲۱) امکان‌پذیر است.

در روش سطح دو محاسبه انتشار گازهای HFC به تفکیک نوع تجهیز و با اطمینان بالاتری انجام می‌شود. محاسبه انتشار به چهار بخش مجزا تفکیک می‌شود (IPCC، ۲۰۰۶): انتشار ناشی از منابع ذخیره‌سازی گازها، انتشار ناشی از شارژ گازها در تولید تجهیزات جدید، انتشار ناشی از نشت و سرویس در طول عمر تجهیزات موجود و انتشار ناشی از تجهیزات اسقاطی. برای محاسبه انتشار در بسیاری از کشورهای در حال توسعه از انتشار ناشی از منابع ذخیره‌سازی گازها صرف‌نظر می‌شود (NAMAs، ۲۰۱۶).

در شارژ تجهیزات جدید طی فرایند اتصال و انفصال مخازن گاز به این تجهیزات، آلایندگی انتشار می‌یابد. مقدار انتشار هنگام شارژ تجهیزات مطابق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$E_{Charge,t} = M_t * \frac{k}{100} \qquad (۱)$$

$E_{Charge,t}$ = میزان انتشار در تولید یا مونتاژ تجهیزات در سال t (بر حسب کیلوگرم)

M_t = مقدار شارژ HFC در تجهیزات جدید در سال t (برحسب کیلوگرم)

k = ضریب انتشار ناشی از شارژ تجهیزات جدید (درصد)

مقدار شارژ (M_t) با تعداد تجهیزات جدید و مقدار شارژ هر تجهیز قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که تجهیزات جدید وارداتی که از قبل شارژ شده‌اند، نباید در نظر گرفته شوند. مقدار k از ۰/۱ الی ۳ درصد متغیر است. بازه مقادیر قراردادی k به تفکیک نوع سامانه‌های تبرید و تهویه مطبوع در مراجع موجود است (IPCC، ۲۰۰۶).

نشت ناشی از اتصالات تجهیزات موجود باعث انتشار آلایندگی می‌شود. آسیب به لوله‌ها یا مبدل‌های حرارتی منجر به انتشار نسبی یا کامل مبرد در جو می‌شود. به علاوه

زمانی که مبرد موجود در تجهیزات کاهش می‌یابد، تجهیزات سرویس می‌شوند. سرویس‌دهی بسته به نوع کاربرد به عنوان مثال سالانه یا هر چند سال یک بار انجام می‌شود. درمورد برخی تجهیزات مانند یخچال‌های خانگی، سرویس‌دهی در طول عمر تجهیز انجام نمی‌شود. در سرویس‌دهی برخی تجهیزات باید نشتی رفع شود و مبرد بازیابی شود؛ در این صورت بازده بازیابی باید در تخمین ضریب انتشار لحاظ شود. میزان آلایندگی تجهیزات موجود از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$E_{Lifetime,t} = B_t * \frac{x}{100} \qquad (۲)$$

$E_{Lifetime,t}$ = میزان انتشار HFC در حین کار تجهیزات در سال t (بر حسب کیلوگرم)

B_t = مقدار HFC موجود در تجهیزات در سال t (برحسب کیلوگرم)

x = ضریب انتشار ناشی از نشت و سرویس سالانه تجهیزات موجود (درصد)

B_t با تعداد کل تجهیزات موجود و مقدار HFC موجود در هر تجهیز محاسبه می‌شود. بدین منظور کلیه تجهیزات در حال کار در کشور شامل تجهیزات تولید داخل و تجهیزات وارداتی مدنظر قرار می‌گیرند. بازه‌ای از مقادیر قراردادی x به تفکیک نوع تجهیز در مراجع ارائه شده است.

میزان آلایندگی ناشی از تجهیزات اسقاطی به میزان مبرد باقی‌مانده و بازیابی شده بستگی دارد. از نظر فنی قسمت عمده مبرد باقی‌مانده قابل بازیابی است، اما این امر به مقررات هر کشور، انگیزه‌های مالی و اهمیت به محیط زیست وابسته است. رابطه (۳) برای محاسبه آلایندگی ناشی از تجهیزات اسقاطی ارائه شده است:

$$E_{end-of-life,t} = M_{t-d} * \frac{p}{100} * (1 - \frac{\eta_{rec,d}}{100}) \qquad (۳)$$

$E_{end-of-life,t}$ = میزان انتشار HFC در تجهیزات اسقاطی در سال t (بر حسب کیلوگرم)

M_{t-d} = میزان شارژ HFC در تجهیزات جدید نصب شده در سال t منهای d (بر حسب کیلوگرم)

p = درصدی از HFC که در تجهیزات اسقاطی نسبت به شارژ اولیه باقی مانده است.

$\eta_{rec,d}$ = بازده بازیابی، که نسبت HFC بازیابی شده به HFC موجود در سامانه است.

در برآورد مقدار شارژ اولیه تجهیزات (M_{t-d})، کلیه تجهیزات تولید داخل و تجهیزات وارداتی در سال t-d مدنظر قرار می‌گیرد.

استفاده از روش سطح دو مستلزم استفاده از ضرایب انتشار است. مقادیر قراردادی برای میزان شارژ، طول عمر و ضرایب انتشار به تفکیک نوع تجهیز در مراجع موجود است.

محاسبه میزان انتشار گاز SF_6

برای محاسبه میزان انتشار گاز SF_6 ناشی از تجهیزات الکتریکی، می‌توان از دو روش سطح یک و سطح دو استفاده نمود.

روش سطح یک برمبنای ضرایب قراردادی انتشار و ساده‌ترین روش تخمین میزان انتشار SF_6 در تجهیزات الکتریکی است. در این روش از ضرایب انتشار پیش‌فرض استفاده می‌شود. محاسبه انتشار ناشی از تجهیزات الکتریکی به چهار بخش تفکیک می‌شود(IPCC، ۲۰۰۶): انتشار ناشی از تولید، انتشار ناشی از نصب تجهیزات، انتشار ناشی از استفاده از تجهیزات و انتشار ناشی از تجهیزات اسقاطی. انتشار ناشی از تولید با استفاده از ضریب انتشار تولید و میزان SF_6 مصرفی توسط تولیدکنندگان تجهیزات محاسبه می‌شود. منظور از انتشار نصب تجهیزات، انتشار ناشی از پرکردن تجهیزات جدید در محل نصب است؛ که با ضریب انتشار نصب و ظرفیت اسمی این تجهیزات، محاسبه می‌شود. انتشار استفاده از تجهیزات شامل انتشار ناشی از نشت، سرویس و تعمیرات تجهیز است؛ که با ضریب انتشار استفاده و ظرفیت تجهیزات مورداستفاده قابل‌محاسبه است. انتشار ناشی از تجهیزات اسقاطی نیز با ضرب کسری از گاز SF_6 که در تجهیز باقی‌مانده در ظرفیت تجهیز

اسقاطی محاسبه می‌شود. ضرایب انتشار پیش‌فرض ارائه شده در IPCC برای تجهیزات عایق‌بندی شده و برای تجهیزات فشار بسته در دسترس است. همچنین می‌توان به ضرایب انتشار کشورهای مختلف در گزارش‌های ملی احصاء موجودی گاز SF_6 آنها دسترسی پیدا کرد.

مبنای محاسبه انتشار در روش سطح دو با روش سطح یک یکسان است، با این تفاوت که در روش سطح دو از ضرایب انتشار ملی استفاده می‌شود. در تهیه ضرایب انتشار قراردادی، منطقه گسترده‌ای در سطح بین‌الملل یا قاره در نظر گرفته می‌شود؛ درحالی‌که ضرایب انتشار ملی متناسب با شرایط منحصربه‌فرد هر کشور تهیه می‌شود. بنابراین اطمینان نتایج حاصل از روش سطح دو به میزان چشم‌گیری نسبت به سطح یک افزایش می‌یابد.

در روش سطح دو بخش انتشار ناشی از تجهیزات اسقاطی، با احتساب بازیافت مقداری از گاز SF_6 باقی‌مانده در تجهیز (برخلاف روش سطح یک) مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

(۴)
$$E_{SF6,Dis} = C_{NP} * MF_{SF6} * (1 - RE * \eta_{Rec} * RF_{SF6})$$

$E_{SF6,Dis}$ = انتشار SF_6 ناشی از تجهیزات اسقاطی (بر حسب تن)

C_{NP} = ظرفیت اسمی تجهیزات اسقاطی (برحسب تن)

MF_{SF6} = کسری از SF_6 که در تجهیز باقی مانده است.

RE = کسری از تجهیزات که SF_6 موجود در آن‌ها بازیافت می‌شود.

η_{Rec} = بازده بازیافت SF_6

RF_{SF6} = کسری از SF_6 که بازیافت می‌شود.

با توجه به اینکه در حال حاضر ضرایب انتشار برای ایران در دسترس نیست، روش سطح دو در محاسبه انتشار ناشی از تجهیزات الکتریکی کارایی ندارد.

برای محاسبه انتشار گاز SF_6 ناشی از فرآیندهای ریخته‌گری منیزیم نیز از روش سطح یک بر مبنای ضرایب قراردادی انتشار و روش سطح دو بر مبنای ضرایب انتشار ملی استفاده می‌شود.

روش سطح یک بر مبنای مقدار کلی ریخته‌گری منیزیم می‌باشد. فرض اصلی برای این روش آن است که کل SF_6 مصرفی در صنایع منیزیم منتشر می‌شود. کل میزان انتشار این گاز ناشی از ریخته‌گری منیزیم از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (IPCC، ۲۰۰۶):

(۵)
$$E_{SF6} = MGc * EF_{SF6} * 10^{-3}$$

E_{SF6} = انتشار SF_6 ناشی از ریخته‌گری منیزیم (بر حسب تن)

MGc = مقدار کل ریخته‌گری منیزیم در کشور (برحسب تن)

EF_{SF6} = ضریب انتشار قراردادی SF_6 در ریخته‌گری منیزیم (کیلوگرم SF_6 بر تن منیزیم) – این ضریب برابر با یک درنظر گرفته شده است.

درصورتی‌که مشخصات فرآیندهای تولید منیزیم در کشور به‌خوبی مستند باشد، کاربرد دقیق‌تر روش سطح یک شامل مجموع داده‌های تولید و ضرایب انتشار، مطابق با فرآیندهای مختلف تولیدی می‌باشد. ازآنجاکه ضرایب ملی شرایط خاص هر کشور را منعکس می‌کنند، ضرایب ملی انتشار بر مبنای اندازه‌گیری‌های کارخانجات نسبت به ضرایب قراردادی انتشار ترجیح داده می‌شوند.

مشابه با روش سطح یک، در روش سطح دو هم فرض می‌شود که کل SF_6 مصرفی در نهایت منتشر می‌شود. در این روش به‌جای مقدار ریخته‌گری منیزیم، از مقدار SF_6 مصرفی در هر کارخانه استفاده می‌شود. طبق فرض صورت گرفته در این روش، میزان انتشار SF_6 ناشی از ریخته‌گری منیزیم برابر با میزان مصرف SF_6 در صنعت منیزیم می‌باشد. با جمع‌آوری مستقیم اطلاعات مربوط به میزان مصرف SF_6 از کلیه مصرف‌کنندگان در صنایع منیزیم، دقت این روش افزایش می‌یابد. در صورتی‌که این اطلاعات موجود نباشد می‌توان با کسب اطلاعات سالیانه در خصوص میزان فروش

SF_6 به صنایع منیزیم، میزان مصرف SF_6 در صنایع منیزیم در کشور را برآورد کرد.

محاسبه میزان انتشار گازهای PFC

در این بخش ابتدا روش محاسبه انتشار گازهای PFC ناشی از تولید آلومینیوم اولیه و سپس روش محاسبه انتشار ناشی از صنایع الکترونیک به‌طور کامل آورده شده است که با توجه به اطلاعات در دسترس از یکی از دو روش سطح یک یا سطح دو برای محاسبه میزان انتشار استفاده می‌شود.

محاسبه انتشار گازهای PFC ناشی از تولید آلومینیوم اولیه در روش سطح یک بر مبنای ضرایب قراردادی انتشار بر مبنای نوع فناوری و در روش سطح دو و روش سطح سه (Tier 3) بر مبنای عملکرد اثر آندی در تولید آلومینیوم اولیه انجام می‌شوند.

در روش سطح یک، از ضرایب انتشار پیش‌فرض مبتنی بر چهار فناوری اصلی مورداستفاده برای تولید آلومینیوم استفاده می‌شود. ازآنجایی‌که عملکرد اثر آندی کارخانه‌ها و درنتیجه انتشار گازهای PFC مستقیماً محاسبه نمی‌شوند، میزان عدم قطعیت در این روش بسیار زیاد می‌باشد. این روش زمانی که داده‌های فرآیندی کارخانه‌ها در دسترس نباشد کاربرد دارد. میزان انتشار گازهای CF_4 و C_2F_6 ناشی از تولید آلومینیوم در این روش از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود (IPCC، ۲۰۰۶). ضرایب قراردادی انتشار برای روش سطح یک در جدول ۳ ارائه شده است:

$$E_{CF4} = \sum(EF_{CF4.i} * MP_i) \quad (۶)$$

$$E_{C2F6} = \sum(EF_{C2F6.i} * MP_i) \quad (۷)$$

E_{CF4} و E_{C2F6} = میزان انتشار CF_4 و C_2F_6 ناشی از تولید آلومینیوم (بر حسب کیلوگرم)

EF_{CF4} و EF_{C2F6}= ضریب انتشار قراردادی برای فناوری نوع i برای CF_4 (کیلوگرم CF_4 بر تن آلومینیوم) و C_2F_6

MP_i = تولید فلز توسط فناوری پیل نوع i (بر حسب تن آلومینیوم)

جدول ۳- ضرایب انتشار جهت برآورد انتشارات ناشی از تولید آلومینیوم بر اساس انواع فناوری پیل (IPCC، ۲۰۰۶)

فناوری	ضریب انتشار برای CF_4	ضریب انتشار برای C_2F_6
CWPB	۰/۴	۰/۰۴
SWPB	۱/۶	۰/۴
VSS	۰/۸	۰/۰۴
HSS	۰/۴	۰/۰۳

در دو روش سطح دو و سه، دو معادله مختلف برای تخمین میزان انتشار CF_4 وجود دارد که هر دو معادله بر اساس رابطه بین اثر آندی و عملکرد تولید هستند. این دو معادله شامل ضریب شیب و ضریب افزایش ولتاژ است. هر دو نوع ضریب بر اساس اندازه‌گیری مستقیم گازهای PFC به دست می‌آیند. در روش سطح دو از یک ضریب که برابر با متوسط اندازه‌گیری‌های تعداد زیادی از کارخانه‌ها است، استفاده می‌شود، در حالی‌که در روش سطح سه برای هر کارخانه از اندازه‌گیری ضریب مخصوص به خودش استفاده می‌شود. با برقراری یک رابطه میان داده‌های فرآیندی اثر آندی و انتشارات PFC، می‌توان با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده به‌جای اندازه‌گیری مستقیم PFC، انتشارات PFC را محاسبه نمود. ازآنجایی‌که مکانیسم فرآیندهایی که PFC منتشر می‌کنند برای گازهای CF_4 و C_2F_6 مشابه هستند، در نتیجه این دو گاز هنگام تخمین میزان انتشار PFC با هم در نظر گرفته می‌شوند. در تمامی روش‌های بیان‌شده انتشارات C_2F_6 به‌عنوان بخشی از انتشارات CF_4 محاسبه می‌شوند. انتخاب بین این دو رابطه تخمین میزان انتشارات، به فناوری مورداستفاده در کنترل فرآیند بستگی دارد. معادله ضریب شیب زمانی استفاده می‌شود که مدت‌زمان اثر آندی در هر روز و به ازای هر پیل ثبت شده باشد و معادله ضریب افزایش ولتاژ زمانی استفاده می‌شود که داده‌های مربوط به ولتاژ اضافی ثبت شده باشند.

ضرایب شیب و افزایش ولتاژ پیل و فناوری برای برآورد انتشارات گازهای PFC ناشی از تولید آلومینیوم بر حسب فناوری‌های مختلف در رفرنس آورده شده است (IPCC، ۲۰۰۶).

روش محاسبه انتشار گازهای PFC ناشی از صنایع الکترونیک بر اساس روش سطح یک بر مبنای ضرایب قراردادی انتشار و روش سطح دو بر مبنای ضرایب و فنّاوری‌های کنترل آلایندگی مختص شرکت‌ها در صنایع الکترونیک توضیح داده می‌شوند.

در روش سطح یک، میزان انتشار گازهای مختلف با استفاده از ضرایب انتشار عمومی مختص کاربردهای مختلف از قبیل نیمه‌هادی‌ها، صفحه‌های نمایش مسطح-ترانزیستور لایه نازک و سلول‌های فتوولتائیک محاسبه می‌شود. این ضرایب میزان متوسط انتشار ناشی از مصرف یک واحد سطح از بسترهای الکترونیکی مانند ویفرهای سیلیکونی، در تولید تجهیزات الکترونیکی را نشان می‌دهد. مقدار مصرف بسترهای الکترونیکی با استفاده از ظرفیت تولید سالانه و ظرفیت فعال نسبت به ظرفیت تولید تخمین زده می‌شود. از رابطه (۸) برای محاسبه انتشار گازهای مختلف به تفکیک کاربرد استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که میزان استفاده از گازهای مختلف در تولید سلول‌های فتوولتائیک بسیار متفاوت است. بنابراین برآورد انتشار ناشی از تولید سلول‌های فتوولتائیک به طور ویژه در این رابطه لحاظ شده است.

$$E_{PFC_i} = EF_i * C_u * C_d * \left(C_{PV} * \delta + (1 - \delta)\right) \quad (۸)$$

E_{PFC_i}= میزان انتشار گاز PFCi ناشی از تولید نیمه‌هادی‌ها، صفحه‌های نمایش مسطح-ترانزیستور لایه نازک و سلول‌های فتوولتائیک (بر حسب کیلوگرم)

EF_i= ضریب انتشار گاز PFCi برحسب میزان آلایندگی ناشی از مصرف یک واحد سطح از بسترهای الکترونیکی (بر حسب کیلوگرم بر مترمربع)

C_u= نسبت ظرفیت فعال نسبت به ظرفیت تولید سالانه

C_d= ظرفیت تولید سالانه بر حسب مقدار مصرف بسترهای الکترونیکی (بر حسب گیگا مترمربع، در مورد سلول‌های فتوولتائیک برحسب مگا مترمربع)

C_{PV}= کسری از تولیدکنندگان سلول‌های فتوولتائیک که از گازهای PFC استفاده می‌کنند.

δ = درمورد سلول‌های فتوولتائیک برابر با یک و درمورد نیمه‌هادی‌ها و صفحه‌های نمایش مسطح-ترانزیستور لایه نازک برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

روش سطح دو مبتنی بر داده‌های مصرف گاز و فناوری کنترل آلایندگی مختص شرکت‌های الکترونیک است. در این روش دو رویکرد قابل استفاده است: عدم احتساب نوع فرایند و احتساب نوع فرایند. در رویکرد اول ضرایب مورداستفاده در محاسبه انتشار هر گاز، میانگین وزنی ضرایب فرایندهای مختلف است. لازم به ذکر است که در مورد کشورهایی که الگوی مصرف گازهای PFC با الگوی مصرف معمول آن در صنعت متفاوت است، عدم احتساب نوع فرایند و استفاده از ضرایب میانگین منجر به خطای محاسبات خواهد شد. در رویکرد دوم ضریب انتشار هر گاز به تفکیک نوع فرایند مدنظر قرار می‌گیرد (IPCC، ۲۰۰۶).

انتشار گازهای PFC در صنایع الکترونیک ناشی از مصرف این گازها در فرایند تولید است، که مطابق با رابطه (۹) قابل محاسبه است.

$$E_{PFC_i} = (1 - h) * C_{PFC_i} * \left(1 - U_{PFC_i}\right) * \left(1 - a_{PFC_i} * d_{PFC_i}\right) \quad (۹)$$

E_{PFC_i}= میزان انتشار گاز PFCi در فرایند تولید (بر حسب کیلوگرم)

C_{PFC_i}= میزان مصرف گاز PFCi (بر حسب کیلوگرم)

h = کسری از گاز که پس از مصرف در مخازن حمل گاز باقی می‌ماند.

U_{PFC_i}= کسری از گاز PFCi که در فرایند تخریب یا تبدیل می‌شود.

a_{PFC_i}= کسری از حجم گاز PFCi که در فرایندهای همراه با فناوری‌های کنترل آلایندگی مصرف می‌شود.

d_{PFC_i}= کسری از گاز PFCi که با فناوری‌های کنترل آلایندگی تخریب می‌شود.

انتشار گازهای PFC نه تنها در اثر مصرف آن‌ها، بلکه از تولید این گازها به عنوان محصولات جانبی فرایند شامل

CF_4، C_2F_6 و C_3F_8 نیز ناشی می‌شود، در واقع در طی فرایند برخی از گازهای مصرفی به گازهای PFC جدید تبدیل می‌شوند. میزان انتشار ناشی از محصولات جانبی با رابطه (۱۰) قابل محاسبه است.

$$E_{PFC_I,FC_j} = (1-h) * B_{PFC_I,FC_j} * C_{FC_j} * \left(1 - a_{FC_j} * d_{FC_j}\right) \quad (۱۰)$$

$PFC_i: CF_4, C_2F_6, C_3F_8$
$FC_j: CF_4, C_2F_6, C_3F_8, c-C_4F_8O, C_4F_6, C_5F_8, CHF_3, CH_2F_2, NF_3, SF_6$

E_{PFC_i,FC_j}= میزان انتشار گاز PFCi در اثر مصرف گاز FCj (برحسب کیلوگرم)

B_{PFC_i,FC_j}= ضریب انتشار گاز PFCi برابر با نسبت تولید گاز PFCi به مصرف گاز FCj

C_{FC_j}= میزان مصرف گاز FC_j (بر حسب کیلوگرم)

h = کسری از گاز که پس از مصرف در مخازن حمل گاز باقی می‌ماند.

a_{FC_j}= کسری از حجم گاز FCj که در فرایندهای همراه با فناوری‌های کنترل آلایندگی مصرف می‌شود.

d_{PFC_i}= کسری از گاز PFCi که با فناوری‌های کنترل آلایندگی تخریب می‌شود.

در رویکرد دوم نیز از روابط فوق برای محاسبه انتشار استفاده می‌شود، با این تفاوت که انتشار به تفکیک نوع فرایند محاسبه شده و ضرایب مورد استفاده شامل h، U_{PFC_i}، a_{PFC_i}، d_{PFC_i} و B_{PFC_i,FC_j} نیز وابسته به نوع فرایند هستند.

محاسبه میزان انتشار گاز NF_3

همان‌طور که پیشتر گفته شد فرآیند تولید گاز NF_3 و صنایع الکترونیک از منابع انتشار گاز NF_3 هستند. در این بخش روش محاسبه انتشار گاز NF_3 ناشی از تولید این گاز و صنایع الکترونیک به‌طور کامل آورده شده است، که با توجه به اطلاعات در دسترس از یکی از دو روش سطح یک یا سطح دو برای محاسبه این میزان انتشار استفاده می‌شود.

روش محاسبه انتشار گاز NF_3 ناشی از فرآیند تولید این گاز با روش سطح یک بر مبنای ضرایب قراردادی انتشار و روش سطح دو بر مبنای بازده فرایند توضیح داده می‌شوند.

در روش سطح یک، از ضرایب قراردادی یا منطقه‌ای برای محاسبه میزان انتشار ناشی از تولید گاز NF_3 استفاده می‌شود. رابطه (۱۱) برای محاسبه انتشار ناشی از تولید این گاز به‌کار می‌رود (IPCC، ۲۰۰۶):

$$E_{NF_3} = EF_{NF_3} * P_{NF_3} \quad (۱۱)$$

E_{NF_3}= میزان انتشار گاز NF_3 ناشی از فرآیند تولید این گاز (برحسب کیلوگرم)

EF_{NF_3} = ضریب انتشار قراردادی گاز NF_3

P_{NF_3}= میزان کل تولید گاز NF_3 (برحسب کیلوگرم)

روش سطح دو مبتنی بر بازده فرآیند برای محاسبه انتشار HFC-23 ناشی از تولید HCFC-22 از کارایی بالایی برخوردار است، زیرا در این حالت تولید محصول جانبی نامطلوب زیاد است. اما این روش برای محاسبه انتشار ناشی از تولید سایر گازها ازجمله گاز NF_3 ناکارآمد است؛ زیرا در فرآیند تولید این گازها، فرآورده‌های جانبی تأثیر کمتری بر بازده فرآیند دارند. عدم اطمینان در اندازه‌گیری بازده فرآیند نسبت به ضریب انتشار بیشتر است؛ به بیانی دیگر استفاده از روش سطح دو (مبتنی بر بازده فرآیند) نسبت به روش سطح یک (مبتنی بر ضریب انتشار) عدم اطمینان بیشتری دارد.

روش محاسبه انتشار گاز NF_3 ناشی از صنایع الکترونیک نیز با روش سطح یک بر مبنای ضرایب قراردادی انتشار و روش سطح دو بر مبنای ضرایب و فنّاوری‌های کنترل آلایندگی مختص شرکت‌ها در صنایع الکترونیک توضیح داده می‌شوند.

در روش سطح یک، میزان انتشار گاز NF_3 با استفاده از ضرایب انتشار عمومی مختص کاربردهای مختلف ۱ برای نیمه‌هادی‌ها، صفحه‌های نمایش مسطح-ترانزیستور لایه نازک و سلول‌های فتوولتائیک محاسبه می‌شود. این ضرایب میزان متوسط انتشار ناشی از مصرف یک واحد سطح از

بسترهای الکترونیکی همچون ویفرهای سیلیکونی، در تولید تجهیزات الکترونیکی را نشان می‌دهد. مقدار مصرف بسترهای الکترونیکی با استفاده از ظرفیت تولید سالانه و ظرفیت فعال نسبت به ظرفیت تولید تخمین زده می‌شود. از رابطه (۱۲) برای محاسبه انتشار گاز NF_3 به تفکیک کاربرد استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که میزان استفاده از این گاز در تولید سلول‌های فتوولتائیک بسیار متفاوت است. بنابراین برآورد انتشار ناشی از تولید سلول‌های فتوولتائیک به‌طور ویژه در این رابطه لحاظ شده است (IPCC، ۲۰۰۶).

$$E_{NF_3} = EF_i * C_u * C_d * (C_{PV} * \delta + (1 - \delta)) \quad (۱۲)$$

E_{NF_3}= میزان انتشار گاز NF_3 ناشی از تولید نیمه‌هادی‌ها، صفحه‌های نمایش مسطح- ترانزیستور لایه نازک و سلول‌های فتوولتائیک (بر حسب کیلوگرم)

EF_i = ضریب انتشار گاز NF_3 بر حسب میزان آلایندگی ناشی از مصرف یک واحد سطح از بسترهای الکترونیکی (بر حسب گرم بر مترمربع)

C_u= نسبت ظرفیت فعال نسبت به ظرفیت تولید سالانه

C_d= ظرفیت تولید سالانه بر حسب مقدار مصرف بسترهای الکترونیکی (بر حسب گیگا مترمربع، در مورد سلول‌های فتوولتائیک بر حسب مگا مترمربع)

C_{PV}= کسری از تولیدکنندگان سلول‌های فتوولتائیک که از گاز NF_3 استفاده می‌کنند.

δ = برای سلول‌های فتوولتائیک برابر با یک و برای نیمه‌هادی‌ها و صفحه‌های نمایش مسطح-ترانزیستور لایه نازک برابر با صفر لحاظ می‌شود.

در دستورالعمل IPCC مقداری برای ضریب انتشار گاز NF_3 برای سلول‌های فتوولتائیک، حتی در ویرایش سال ۲۰۱۹ ارائه نشده است؛ و در مورد سلول‌های فتوولتائیک تنها به ضرایب انتشار گازهای CF_4 و C_2F_6 بسنده شده است. در سال ۲۰۰۹ انتشار گاز NF_3 حین تمیز کردن راکتور در تولید سلول‌های فتوولتائیک لایه نازک بر پایه سیلیکون، برای چندین کارخانه در نقاط مختلف جهان مورد بررسی قرار گرفته و ضریب انتشار گاز NF_3 در این فرایند ۰/۱۱ درصد وزنی از کل گاز مصرفی در این فرایند گزارش شده است (Fthenakis و Clark، ۲۰۱۰).

روش سطح دو مبتنی بر داده‌های مصرف گاز و فناوری کنترل آلایندگی مختص شرکت‌های الکترونیک است. در این روش دو رویکرد قابل استفاده است: عدم احتساب نوع فرایند و احتساب نوع فرایند. در رویکرد اول ضرایب مورد استفاده در محاسبه انتشار هر گاز، میانگین وزنی ضرایب فرایندهای مختلف است. در مورد کشورهایی که الگوی مصرف گاز NF_3 با الگوی مصرف معمول آن در صنعت متفاوت است، عدم احتساب نوع فرایند و استفاده از ضرایب میانگین منجر به خطای محاسبات خواهد شد. در رویکرد دوم ضریب انتشار هر گاز به تفکیک نوع فرایند مدنظر قرار می‌گیرد.

انتشار گاز NF_3 در صنایع الکترونیک ناشی از مصرف این گازها در فرایند تولید است، که مطابق با رابطه (۱۳) قابل محاسبه است (IPCC، ۲۰۰۶).

$$E_{NF_3} = (1 - h) * C_{NF_3} * (1 - U_{NF_3}) * (1 - a_{NF_3} * d_{NF_3}) \quad (۱۳)$$

E_{NF_3}= میزان انتشار گاز NF_3 در فرایند تولید (بر حسب کیلوگرم)

C_{NF_3}= میزان مصرف گاز NF_3 (بر حسب کیلوگرم)

h = کسری از گاز که پس از مصرف در مخازن حمل گاز باقی می‌ماند.

U_{NF_3}= کسری از گاز NF_3 که در فرایند تخریب یا تبدیل می‌شود.

a_{NF_3}= کسری از حجم گاز NF_3 که در فرایندهای همراه با فناوری‌های کنترل آلایندگی مصرف می‌شود.

d_{NF_3}= کسری از گاز NF_3 که با فناوری‌های کنترل آلایندگی تخریب می‌شود.

نتایج محاسبه انتشار معادل دی‌اکسیدکربن

نتایج محاسبه انتشار گازهای HFC

مطابق با سومین گزارش ملی کشور، گازهای HFC در

ایران تولید نمی‌شود و اطلاعاتی از واردات و صادرات آن نیز در دسترس نیست. در این گزارش تنها مقدار مصرف و واردات گاز HFC-134a در دسترس بوده و بر مبنای آن میزان انتشار گازهای HFC در بخش صنایع فرایندی در سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰)، ۰/۳۴ گیگاگرم تخمین زده شده است. (TNC، ۲۰۱۷).

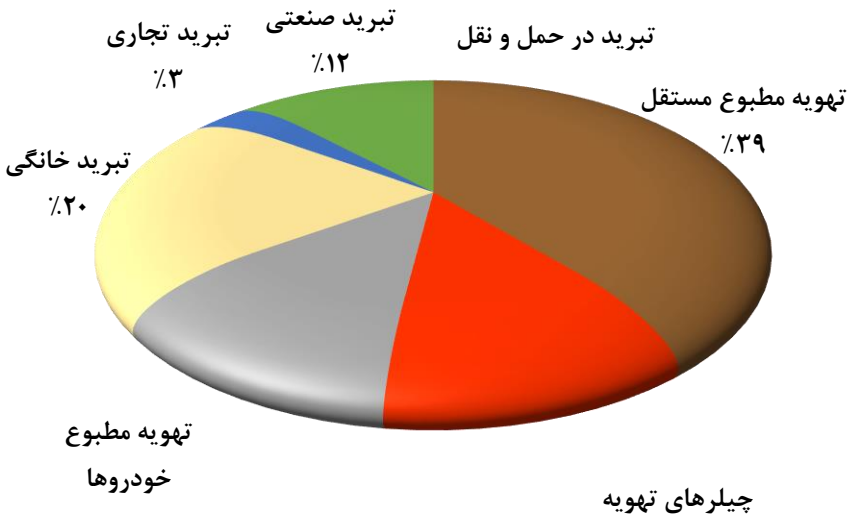
وضعیت اطلاعات جامع‌تر موجود در مورد انتشار گازهای HFC ناشی از سامانه‌های تبرید و تهویه مطبوع در ایران محدود به گزارشی در سال ۲۰۱۸ است. در این گزارش تعداد دستگاه‌های تولیدی و وارداتی سامانه‌های مختلف تبرید و تهویه مطبوع از سال ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۵ از شرکت‌های مرتبط جمع‌آوری شده است. این داده‌ها مربوط به ۷ گروه شامل بخش تهویه مطبوع مستقل، چیلرها، تهویه مطبوع در وسایل نقلیه، یخچال‌های خانگی، یخچال‌های مستقل و واحدهای کندانس، یخچال‌های صنعتی، یخچال‌های بخش سرمایش در حمل و نقل می‌باشد. مطابق با اطلاعات گزارش مرجع، مقدار کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش تبرید و تهویه مطبوع ایران در سال ۲۰۱۵ برابر با ۴۹/۵ میلیون تن معادل نفت خام می‌باشد که بخش عمده آن مطابق با شکل ۴ مربوط به تهویه مطبوع مستقل است. این محاسبات بر مبنای استفاده از روش سطح دو انجام گرفته است. اما متاسفانه اطلاعات کافی برای پارامترهای موردنیاز در این گزارش ارائه نشده است و لذا بازتولید محاسبات انجام شده امکان‌پذیر نیست (RAC، ۲۰۱۸).

نرخ رشد این تجهیزات در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۶ در این گزارش آورده شده است و با استفاده از این نرخ می‌توان تعداد تجهیزات این ۷ گروه را با تقریب به‌روزرسانی و مقادیر انتشار را محاسبه نمود. در شکل ۵ میزان انتشار سالانه در سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۰ مطابق با اطلاعات مرجع و در سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۱۶ با استفاده از تقریب به کار رفته، نشان داده شده است.

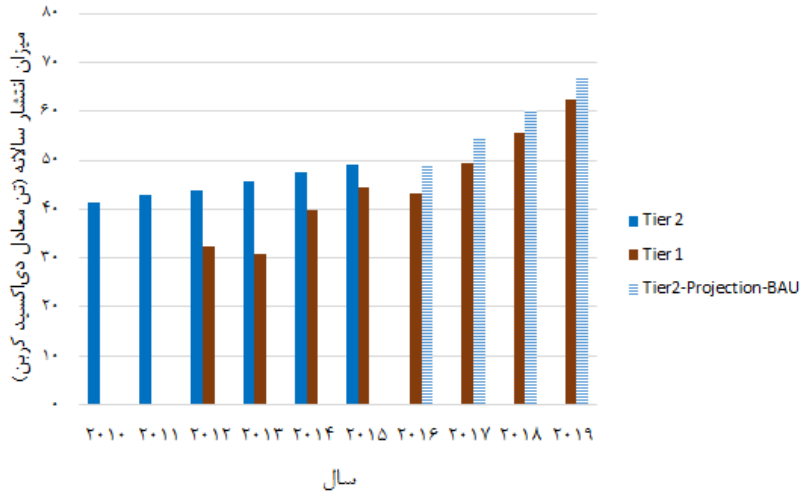
همچنین داده‌های مصرف و واردات گازهای HFC از سال ۲۰۱۶ الی ۲۰۱۹ نیز در مراجع غیررسمی موجود است، که در به‌روزرسانی میزان انتشار با تقریب و با استفاده از روش سطح یک کارایی دارد. مقدار کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در این بخش در سال ۲۰۱۹ با استفاده از روش سطح یک، ۶۲/۳۵ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن براورد شده است. در شکل ۵ میزان انتشار محاسبه شده سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۱۲ با روش سطح یک نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، مقادیر محاسباتی از روش‌های سطح یک و دو بر یکدیگر منطبق نیستند. علت این امر دقت داده‌های مورد استفاده در هر یک از این دو روش و خطای استفاده از روش سطح یک است. داده‌های مبرد مصرفی دقت پایینی دارند، به طوری‌که مقادیر مصرف برخی از مبردها با مقادیر معمول منطبق نیستند. به علاوه این داده‌ها از جامعیت برخوردار نیستند و برخی از مبردها در آن‌ها لحاظ نشده است. در روش سطح یک از فرضیات مختلف در محاسبه میزان انتشار استفاده می‌شود. این فرضیات با مطالعه چندین کشور خاص حاصل شده است؛ بنابراین استفاده از آن‌ها برای کشورهای دیگر با توجه به تفاوت تجهیزات، فناوری‌ها، نحوه مصرف و میزان انتشار منجر به خطای چشم‌گیری می‌شود. همچنین در روش سطح یک فرضیات مورد استفاده از جمله ضریب انتشار مستقل از نوع تجهیز لحاظ می‌شود؛ در حالی‌که تجهیزات مختلف ضرایب انتشار متفاوتی دارند.

در حال حاضر ضرایب انتشار ملی در کشور ایران بر اساس اطلاعات تولیدکنندگان تجهیزات تبرید و تهویه مطبوع، شرکت‌های خدماتی و مراکز اسقاط تجهیزات در دسترس نیست؛ با تهیه ضرایب ملی می‌توان دقت محاسبات انتشار و در نتیجه اتخاذ راهکارهای مناسب برای کاهش انتشار را بهبود بخشید. در شرایطی که امکان تهیه ضرایب ملی میسر نباشد، باید از ضرایب انتشار پیش‌فرض طبق دستورالعمل IPCC، ۲۰۰۶ بهره برد. این مقادیر با توجه به

شرایط بین‌المللی تولید و استفاده از تجهیزات برای کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه گزارش شده است.



شکل ۴- مقدار کل انتشار گازهای گلخانه‌ای برای سناریوی پایه در بخش تبرید و تهویه مطبوع ایران در سال ۲۰۱۵



شکل ۵- مقایسه مقدار کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش تبرید و تهویه مطبوع ایران با روش‌های سطح یک و سطح دو

نتایج محاسبه انتشار گازهای SF_6

مطابق با سومین گزارش ملی کشور، گاز SF_6 در ایران تولید نمی‌شود و اطلاعاتی از واردات و صادرات آن نیز در دسترس نیست. این گاز در صنایع آلومینیوم و منیزیم به عنوان گاز حامل کاربرد ندارد و میزان تقریبی انتشار آن به سبب مصرف در مدارشکن‌ها و تابلوهای برق عایق‌بندی شده با این گاز در سال ۱۳۸۹ (۲۰۱۰)، ۰/۰۰۶ گیگاگرم گزارش شده است (TNC، ۲۰۱۷).

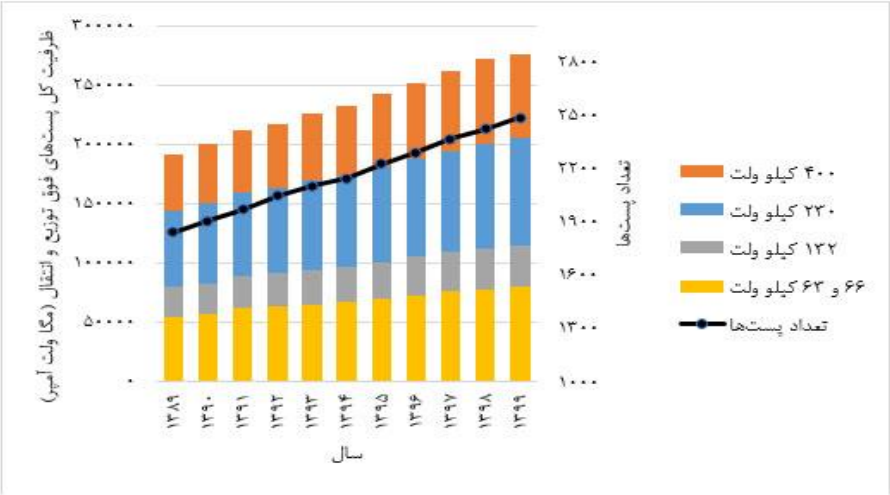
در حال حاضر نیز وضعیت اطلاعات موجود در مورد انتشار گاز SF_6 ناشی از تجهیزات الکتریکی در ایران بسیار ناکافی می‌باشد. بنابراین تخمین میزان انتشار این گاز، تنها با اتکاء به داده‌های پست‌های انتقال و فوق‌توزیع صورت می‌گیرد.

با استفاده از گزارش‌های روند ده‌ساله صنعت برق ایران و آمار تفصیلی صنعت برق ایران مربوط به شرکت توانیر، داده‌های موجود برای ظرفیت کل پست‌های انتقال و فوق

توزیع، تعداد این پست‌ها و همچنین ظرفیت پست‌های GIS[5] در سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹ استخراج شده است.

پست‌های انتقال و فوق‌توزیع در ۴ سطح ولتاژ ۴۰۰، ۲۳۰، ۱۳۲ و ۶۶ و۶۳ کیلوولت دسته‌بندی می‌شوند، که هر یک با میزان رشد متفاوتی طی سال‌های پیشین افزایش یافته‌اند. شکل ۶ روند افزایش کل ظرفیت پست‌های انتقال و فوق‌توزیع و تعداد کل آنها را نشان می‌دهد.

از مجموع ظرفیت‌ها در سطوح ولتاژ مختلف، ظرفیت پست‌های GIS و AIS[6] در هر سال حاصل شده است. قابل ذکر است که پست‌های نیروگاهی بلافصل در محاسبات لحاظ نشده است، علت آن است که میزان پست‌های GIS مربوط به این نوع پست‌ها در گزارش‌های صنعت برق موجود نیست. با توجه به اینکه نوع پست تأثیر قابل‌توجهی در میزان SF_6 مصرفی دارد و از آن‌جاکه تعداد پست‌های GIS و AIS به تفکیک در مراجع مربوطه ذکر نشده بود، تعداد هر کدام از این پست‌ها، با توجه به کسری که از ظرفیت کل پست‌های انتقال و فوق توزیع دارند، تخمین زده می‌شود. با فرض موجودی میانگین ۴۰۰ کیلوگرم گاز SF6 برای پست‌های GIS و ۶۵ کیلوگرم برای پست‌های AIS (Ghadimi، ۲۰۰۶)، میزان کل SF_6 مصرفی در پست‌ها تخمین زده می‌شود. برای محاسبه انتشار نمی‌توان از ضرایب انتشار IPCC، ۲۰۰۶بهره برد. این مقادیر در حالت تولید و استفاده از تجهیزات برای کشورهای اروپایی، امریکا و ژاپن گزارش شده است و استفاده از این اعداد برای محاسبات انتشار در کشور ایران توجیه ندارد. بنابراین در تحقیق حاضر از سومین گزارش ملی کشور به کنوانسیون تغییر اقلیم به عنوان مبنای محاسبات انتشار استفاده شده است.

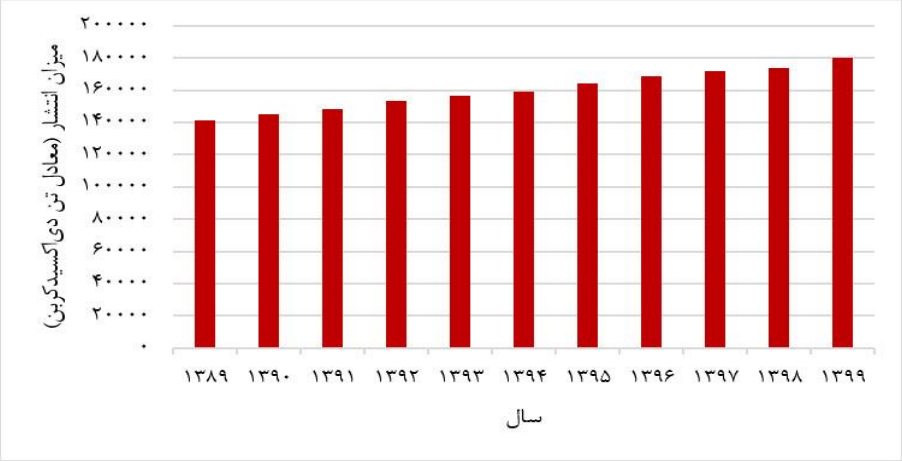


شکل ۶- روند افزایش ظرفیت و تعداد کل پست‌های انتقال و فوق‌توزیع برق، ۱۳۹۹ – ۱۳۸۹ (بدون احتساب پست‌های بلافصل نیروگاهی)

در این گزارش میزان تقریبی انتشار گاز SF_6 در سال ۱۳۸۹، ۰/۰۰۶ گیگاگرم بوده که با لحاظ میزان پتانسیل گرمایش جهانی ۲۳۵۰۰، مقدار آن ۱۴۱۰۰۰ تن معادل دی‌اکسیدکربن است. مطابق با اطلاعات دریافتی در سال ۱۳۸۹ کل ظرفیت پست‌های انتقال و فوق توزیع برق کشور ۱۹۱۷۲۷ مگاولت آمپر بوده است، که از این میزان به ترتیب ۹۵/۶ و ۴/۴ درصد مربوط به پست‌های AIS و GIS بوده است. تعداد کل پست‌ها در این سال نیز حدود ۱۸۴۰ عدد (بدون احتساب بلافصل نیروگاهی) تخمین زده شده است. بدین‌ترتیب میزان کل گاز SF_6 مصرف‌شده در پست‌های برق کشور در سال ۱۳۸۹ حدودا برابر با ۱۴۶۶۲۶ کیلوگرم می‌باشد. با مبنا گرفتن عدد انتشار مربوط به سال ۱۳۸۹ و

در نظر گرفتن پتانسیل گرمایش جهانی، ضریب انتشار این گاز از پست‌های برق حدود ۴ درصد وزنی می‌باشد. با لحاظ این ضریب انتشار، میزان انتشار معادل دی‌اکسیدکربن گاز SF_6 از سال ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۹ تخمین و در شکل ۷ ارائه شده است. بدین‌ترتیب مقدار انتشار گاز SF_6 ناشی از استفاده از پست‌های برق کشور در سال ۱۳۹۹ (۲۰۲۰) برابر با ۱۸۰۲۲۳ تن (۱۸۰ گیگاگرم) معادل دی‌اکسیدکربن و با استفاده از روش سطح اول تخمین زده شده است. این در حالی است که با توجه به ضرایب انتشار موجود در IPCC انتشار ایجادشده ناشی از تولید تجهیزات الکتریکی نیز در کنار انتشار ناشی از استفاده از تجهیزات در طول عمر آن‌ها باید لحاظ شود، که اطلاعات مربوط به میزان تولیدات این پست‌ها در داخل کشور در دسترس نیست.

چنانچه در سومین گزارش ملی کشور انتشار هنگام تولید و نصب تجهیزات لحاظ شده باشد، اعداد محاسبه شده در شکل ۷ شامل انتشار هنگام تولید و نصب تجهیزات نیز می‌باشند. متأسفانه در این گزارش به این مهم اشاره نشده است. اما با مقایسه ضریب انتشار بدست آمده با مقادیر کشورهای مختلف جهان (UNFCCC، ۲۰۲۱) به نظر می‌رسد که انتشار بخش تولید نیز لحاظ شده است. همچنین مطابق با گزارش کشورهای مختلف، انتشار ناشی از اسقاط در مقایسه با انتشار بخش تولید و مصرف قابل صرف‌نظر کردن است. شایان ذکر است که ضرایب انتشار تأثیر زیادی بر محاسبه میزان انتشار خواهد داشت. در تکمیل موجودی انتشار باید از ضرایب انتشار ملی استفاده شود و ضرایب موجود در سایر منابع قابل اتکا نیستند. این ضرایب باید با توجه به ویژگی تجهیزات الکتریکی کشور و استفاده یا عدم استفاده از سامانه‌های بازیابی در آن‌ها ارائه شود.



شکل ۷- روند انتشارات معادل دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف گاز SF6 در پست‌های انتقال و فوق توزیع برق کشور، ۱۳۹۹ -۱۳۸۹

نتایج محاسبه انتشار گازهای PFC

طبق سومین گزارش ملی کشور به کنوانسیون تغییر اقلیم، گازهای PFC در ایران تولید نمی‌شوند و اطلاعاتی از واردات و صادرات آنها نیز در دسترس نیست. همچنین تنها منبع انتشار گازهای PFC در ایران ناشی از تولید آلومینیوم اولیه می‌باشد که مقدار آن در سال ۱۳۸۹، به میزان ۰/۶ گیگاگرم CF_4 و ۰/۰۴ گیگاگرم C_2F_6 تخمین زده شده است (TNC، ۲۰۱۷). ذکر این نکته ضروری است که محاسبات تخمین انتشار گازهای PFC در این گزارش بر مبنای فناوری SWPB صورت گرفته است، در حالی‌که در حال حاضر این فناوری از رده خارج شده است و شرکت‌های تولید آلومینیوم ایران حداقل از فناوری CWPB استفاده می‌کنند.

بر مبنای استعلام در مورد فناوری مورداستفاده در فرآیند احیای آلومینیوم در کشور، فناوری‌های سودربرگ شامل HSS و VSS هیچ‌گاه در ایران کارایی نداشته‌اند. از میان فناوری‌های پیش‌پخت نیز، فناوری SWPB که در آن تغذیه آلومینا به صورت دستی صورت می‌گیرد، از رده خارج شده است. بنابراین در شرکت‌های تولید آلومینیوم ایران از فناوری CWPB استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر برخی از این شرکت‌ها اقدام به جایگزینی و توسعه فناوری PFPB در تمام یا برخی از خطوط تولید خود نموده‌اند. به‌منظور محاسبه میزان انتشار گازهای PFC ناشی از تولید آلومینیوم اولیه بر مبنای اطلاعات موجود از روش سطح یک استفاده می‌شود. در این روش ضرایب انتشار فناوری PFPB ارائه نشده است و اطلاع دقیقی از میزان استفاده از این فناوری در شرکت‌های تولیدکننده آلومینیوم در دسترس نیست، با فرض استفاده از فناوری CWPB در صنایع آلومینیوم ایران میزان انتشار محاسبه شده است. بنابراین مقدار محاسبه شده عدم قطعیت بالایی دارد و تنها در جهت تخمین میزان انتشار گازهای PFC ارائه شده است.

در جدول ۴ میزان تولید سالانه آلومینیوم در ایران از سال ۱۳۸۴ الی ۱۳۹۹، میزان انتشار گازهای PFC شامل CF_4 و C_2F_6 ناشی از تولید آلومینیوم و انتشار معادل دی‌اکسیدکربن آن گزارش شده است. این مقادیر با استفاده از پتانسیل گرمایش جهانی IPCC، ۲۰۰۶ محاسبه شده است.

همانطور که قبلا اشاره شد انتشار گازهای PFC ناشی از صنایع الکترونیک که یکی دیگر از اصلی‌ترین منابع جهانی انتشار این گازها می‌باشند، در کشور مشاهده نمی‌شود.

جدول ۴- میزان انتشار سالیانه گازهای PFC ناشی از تولید آلومینیوم در ایران

سال	میزان تولید (هزار تن)	میزان انتشار (گیگاگرم)		میزان انتشار گازهای PFC (گیگاگرم)	میزان انتشار معادل دی‌اکسیدکربن (گیگاگرم)
		CF_4	C_2F_6		
۱۳۸۴	۲۱۹	۰/۰۸۸	۰/۰۰۹	۰/۰۹۶	۶۷۸
۱۳۸۵	۲۰۵	۰/۰۸۲	۰/۰۰۸	۰/۰۹۰	۶۳۵
۱۳۸۶	۲۰۳	۰/۰۸۱	۰/۰۰۸	۰/۰۸۹	۶۲۸
۱۳۸۷	۲۴۸	۰/۰۹۹	۰/۰۱۰	۰/۱۰۹	۷۶۸
۱۳۸۸	۲۸۱	۰/۱۱۲	۰/۰۱۱	۰/۱۲۴	۸۷۰
۱۳۸۹	۳۰۳	۰/۱۲۱	۰/۰۱۲	۰/۱۳۳	۹۳۸
۱۳۹۰	۳۲۹	۰/۱۳۲	۰/۰۱۳	۰/۱۴۵	۱۰۱۹
۱۳۹۱	۳۳۷	۰/۱۳۵	۰/۰۱۳	۰/۱۴۸	۱۰۴۳
۱۳۹۲	۳۴۹	۰/۱۴۰	۰/۰۱۴	۰/۱۵۴	۱۰۸۱
۱۳۹۳	۳۵۴	۰/۱۴۲	۰/۰۱۴	۰/۱۵۶	۱۰۹۶
۱۳۹۴	۳۵۳	۰/۱۴۱	۰/۰۱۴	۰/۱۵۵	۱۰۹۳
۱۳۹۵	۳۴۱	۰/۱۳۶	۰/۰۱۴	۰/۱۵۰	۱۰۵۶
۱۳۹۶	۳۳۸	۰/۱۳۵	۰/۰۱۴	۰/۱۴۹	۱۰۴۶
۱۳۹۷	۳۰۱	۰/۱۲۰	۰/۰۱۲	۰/۱۳۲	۹۳۲
۱۳۹۸	۲۷۸	۰/۱۱۱	۰/۰۱۱	۰/۱۲۲	۸۶۱
۱۳۹۹	۳۶۵	۰/۱۴۶	۰/۰۱۵	۰/۱۶۱	۱۱۳۰

نتایج محاسبه انتشار گاز NF_3

در گزارش‌های ملی کشور به کنوانسیون تغییر اقلیم، موجودی انتشار گازهای گلخانه‌ای حاوی فلوئور شامل گازهای HFC، PFC و SF_6 ارائه شده است، در هیچ‌یک از این گزارش‌ها به موجودی گاز NF_3 پرداخته نشده است. علت این امر اضافه شدن این گاز از سال ۲۰۱۳ به پروتکل

کیوتو و فهرست موجودی گازهای گلخانه‌ای است؛ سومین گزارش ملی کشور (TNC، ۲۰۱۷) به‌عنوان آخرین گزارش موجود، در سال ۲۰۱۰ تهیه شده است.

طبق اطلاعات موجود گازهای حاوی فلوئور از جمله گاز NF_3 در ایران تولید نمی‌شوند. بر اساس آخرین آمارهای گمرک، واردات گاز NF_3 در کد تعرفه‌های اختصاصی ثبت نمی‌شود. واردات در این کد تعرفه‌ها از کشورهای چین، آلمان و جمهوری کره است. آمار واردات گاز NF_3 نیازمند تفکیک این گاز از سایر مواد شیمیایی در تعرفه‌های گمرکی است. بر مبنای استعلام از واردکنندگان گازهای مختلف، این گاز به ایران وارد نمی‌شود. با توجه به کارایی این گاز تنها در صنایع با فناوری پیشرفته و انحصار تقریبی آن به چند کشور خاص، این نتیجه دور از ذهن نیست.

چالش‌های موجود در تکمیل خلأهای اطلاعاتی

چالش‌های موجود در تکمیل خلأهای اطلاعاتی در راستای تکمیل موجودی انتشار گازهای گلخانه‌ای را می‌توان مطابق با جدول ۵ در چهار دسته از قبیل دسترسی به داده‌های فعالیت، روش‌ها و ابزار، منابع انسانی و محدودیت‌های مالی طبقه‌بندی کرد.

دسترسی به داده‌های فعالیت: عدم دسترسی به داده‌ها و قابلیت اطمینان آن‌ها را می‌توان از موضوعات اصلی و چالش‌برانگیز در تهیه موجودی گازهای گلخانه‌ای دانست. در حال حاضر هیچ‌گونه فرایندی برای جمع‌آوری داده‌های گازهای فلوئوردار در ایران وجود ندارد. بنابراین داده‌های بسیار محدودی از این گازها در دسترس است و داده‌های لازم برای احتساب انتشار آن‌ها در صورت امکان تخمین زده می‌شود. به‌علاوه بسیاری از این داده‌ها با توجه به ضعف در جمع‌آوری و مدیریت آن‌ها از اطمینان کافی برخوردار نیستند. جمع‌آوری داده‌های جامع بسیار دشوار است و به دلیل عدم دسترسی به تمامی منابع انتشار ازجمله داده‌های صنایع کوچک و غیررسمی شکاف‌های بزرگی در دقت داده‌ها ایجاد می‌شود. همچنین بسیاری از داده‌های مورد نیاز محرمانه قلمداد شده و به‌راحتی در اختیار محققان قرار نمی‌گیرند. ادغام و تجمیع داده‌ها بدون مدیریت جمع‌آوری داده منجر به کاهش اطمینان داده‌ها می‌شود. درواقع ناهماهنگی منابع مختلف در ارائه و نمایش داده‌ها در یک قالب واحد از تجمیع دقیق داده‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین قابل‌توجه است که تفاوت در تعریف اصطلاحات مختص موجودی گازهای گلخانه‌ای نیز می‌تواند بر صحت موجودی حاصل تأثیر بگذارد.

روش‌ها و ابزارها: ضرایب انتشار مورد استفاده برای محاسبات و تجزیه و تحلیل انتشار ناشی از گازهای گلخانه‌ای فلوئوردار، مقادیر پیش‌فرض IPCC هستند و ضرایب انتشار محلی در کشور تهیه نشده است. استفاده از این مقادیر پیش‌فرض، خود از عوامل ایجاد عدم اطمینان در محاسبات است. کمبود ظرفیت‌های آماری، نبود ابزار و فناوری‌های اندازه گیری از دیگر مشکلات هستند.

منابع انسانی: از دیگر چالش‌های تهیه موجودی این گازها، ظرفیت فنی محدود متخصصان و کارکنان است. هیچ برنامه‌ای برای آموزش مستمر آن‌ها وجود ندارد.

محدودیت‌های مالی: پشتیبانی مالی برای بهبود کمی و کیفیت موجودی ملی گازهای گلخانه‌ای نیاز است.

رفع خلأهای اطلاعاتی و چالش‌های موجود در محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای جدید در گرو ایجاد ظرفیت‌های موردنیاز با همکاری سازمان‌ها و بخش‌های مختلف کشور است. ظرفیت و پشتیبانی‌های موردنیاز را می‌توان به ۴ دسته تقسیم نمود:

توسعه و انتقال فناوری: پشتیبانی موردنیاز جهت توسعه و انتقال فناوری‌های نوآورانه و عملی برای حمایت از اقدامات لازم

پشتیبانی فنی: پشتیبانی متخصصان بین‌المللی که می‌تواند شامل اشتراک اطلاعات و تخصص، انتقال دانش و داده‌های فنی، خدمات مشاوره‌ای، پشتیبانی در توسعه و اجرای سیاست‌ها و توسعه مکانیسم‌ها و روش‌ها باشد.

ظرفیت‌سازی: پشتیبانی موردنیاز برای توسعه و تقویت

مهارت‌ها، توانایی‌ها، فرایندها و منابع سازمان‌ها و ذینفعان برای برنامه‌ریزی و انجام اقدامات

پشتیبانی مالی: پشتیبانی مالی در قالب پول، گرنت و وام و تضمین حمایت مالی دولتی و سرمایه‌گذار خصوصی برای پوشش فعالیت‌ها و هزینه‌ها

با اجرای راهکارهای مؤثر در رفع چالش‌های مذکور می‌توان زیرساخت‌های موردنیاز را اجرا و داده‌ها را تکمیل نمود. این مهم با مشارکت گسترده سازمان‌ها و شرکت‌های خصوصی در بخش‌های مختلف میسر می‌شود.

جدول ۵- چالش‌های تکمیل موجودی گازهای گلخانه‌ای در کشور و راهکارهای رفع آن‌ها

چالش		راهکار
دسترسی به داده‌های فعالیت	موجود نبودن فرایند ثبت، جمع‌آوری و مدیریت داده‌ها	توسعه رویه‌های مستندسازی/ توسعه استراتژی‌های جمع‌آوری و مدیریت داده‌ها/ ایجاد سامانه‌های بایگانی داده‌ها و نگهداری سوابق/ ایجاد ساز و کار ممیزی و گزارش‌دهی انتشار در بنگاه‌های اقتصادی
	عدم اطمینان داده‌ها و مستندات	ارائه رویه‌های تضمین کیفیت و مدیریت عدم اطمینان/ ایجاد پایگاه‌های داده مختلف از عوامل انتشار، داده‌های فعالیت و فرضیات و مقایسه آن‌ها/ استفاده از زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات
	عدم جامعیت داده‌ها از جمله صنایع کوچک و غیر رسمی	تهیه پرسشنامه‌های مستقیم/ ایجاد ظرفیت برای ذینفعان
	عدم دسترسی به داده‌های محرمانه	بهبود ترتیبات نهادی در سطح ملی
	عدم اطمینان در تجمیع و ادغام داده‌ها	ارائه روش برای هم‌ارزسازی موجودی انتشار گازهای مختلف
روش‌ها و ابزار	عدم توسعه ضرایب انتشار ملی	تهیه ضرایب انتشار ملی منطبق با روش‌های بین‌المللی / حمایت از بخش تحقیق و توسعه بنگاه‌های علمی در توسعه ضرایب انتشار ملی
	کمبود ظرفیت‌های آماری	ایجاد سازوکارهای آمارگیری
	نبود ابزار و فناوری‌های اندازه‌گیری	توسعه سامانه‌های اندازه‌گیری/ انتقال فناوری‌های نوآورانه و عملی در سطح منطقه‌ای و بین‌المللی / ارائه دستورالعمل‌های فنی
منابع انسانی	دانش محدود متخصصان	افزایش ظرفیت متخصصان در سطح بین‌المللی/آموزش روند معمول تهیه موجودی گازها و تعیین تکلیف مجریان / ایجاد شبکه تبادل اطلاعات در مورد مسائل تغییر اقلیم
	موجود نبودن برنامه‌های آموزشی	تدوین برنامه‌های آموزشی مستمر/ توسعه راهبردی همکاری‌های بین‌المللی در جهت آموزش و تبادل تجربیات/ مشارکت متخصصانی که در تهیه موجودی‌های قبلی انتشار شرکت کرده‌اند
محدودیت‌های مالی	عدم پشتیبانی مالی برای تکمیل موجودی گازها	پشتیبانی مالی دولتی، سرمایه‌گذار خصوصی و بین‌المللی / بازنگری قوانین و رفع موانع در جذب کمک‌های مالی بین‌المللی

راهکارهای کاهش انتشار

در این بخش راهکارهای کاهش انتشار برای گازهای حاوی فلوئور و اثر سیاست‌های توسعه‌ای کشور بر تغییر انتشارات در آینده بررسی خواهند شد.

HFC: در ایران مبردهای سرماساز تولید نمی‌شوند؛ بنابراین نوع مبرد مصرفی در ایران وابسته به بازار جهانی است. با توجه به اینکه در بسیاری از کشورها مبردهای HCFCاز رده خارج شده‌اند، بازار مصرف به سمت مبردهای HFC تغییر کرده است. کاهش انتشار این گازها منوط به تغییر فناوری‌های موجود در بخش تبرید و تهویه مطبوع با هدف سازگاری بیشتر با محیط زیست و وجود چارچوب‌های نظارتی است. در غیر این صورت با توجه به افزایش تقاضای سامانه‌های خنک‌کننده، میزان انتشار گازهای HFC در کشور افزایش خواهد یافت.

گام اصلی در کاهش انتشار گازهای HFC در بخش تبرید و تهویه مطبوع، بهبود بازدهی انرژی و استفاده از

دستگاه‌های با بازدهی انرژی بالا می‌باشد. الزام برچسب زدن انرژی بر روی دستگاه‌ها، انطباق دستگاه‌ها با استاندارد عملکرد با حداقل انرژی (MEPS[۷])، هماهنگ‌سازی استانداردهای حداقل مصرف انرژی با استانداردهای جهانی، کنترل نشتی ناشی از تجهیزات و بازیابی تجهیزات اسقاطی، استفاده از سامانه‌های یکپارچه هوشمند در وسایل تهویه مطبوع، عایق‌کاری حرارتی ساختمان‌ها، بهبود در طراحی کمپرسورهای تجهیزات تهویه مطبوع، استفاده از کمپرسورهای سرعت متغیر با بهره‌برداری از کمترین مصرف انرژی، و استفاده از مبردهای جایگزین و استفاده از سامانه‌های تولید همزمان سرمایش برای محیط و تولید آب گرم (CCHP[۸]) که علاوه بر امکان پیک‌سایی مصرف برق در ساعات اوج مصرف در کشور، می‌توان از ظرفیت‌های خالی ایجاد شده در صنعت نیروگاهی به منظور صادرات برق نیز استفاده کرد، استفاده از پمپ حرارتی گازسوز با راندمان بالا مطابق با بخشنامه هیأت دولت در سال ۱۳۹۳ مبنی بر استفاده از تجهیزات برودتی تراکمی با اولویت سامانه‌های برودتی تراکمی گازسوز در ساختمان‌های تجاری، اداری و مسکونی که عمدتاً مصرف برق مقطعی برای ایجاد سرمایش در تابستان دارند. این سامانه همانند تجهیزات سرمایشی تراکمی برقی، نیازی به زیرساخت‌های شبکه انتقال برق از جمله تابلوهای برق سه فاز در ورودی به ساختمان‌ها ندارد. بومی‌سازی محصول فوق علاوه بر کاهش واردات تجهیزات سرمایشی گازسوز از سایر کشورها و صرفه‌جویی ارزی، عامل کاهش مصرف انرژی اولیه و مؤثر در پیک‌زدایی مصرف برق در تابستان است. از مزایای اصلی این دستگاه امکان استفاده از فناوری جدید جریان مبرد متغیر (VRF[۹]) است.

اکنون تقریبا در تمامی زیرگروه‌های بخش تبرید و تهویه مطبوع، فناوری‌های جایگزینی موجود است که بدون گازهای HFC کار کنند. در بخش تهویه مطبوع مستقل به جای استفاده از مبردهای R۴۱۰A، R۴۰۷C، R۴۰۴A، R۳۲، می‌توان از هیدروکربن‌هایی مانند R۲۹۰، به عنوان مبردهایی با پتانسیل گرمایش جهانی پایین استفاده کرد. در بخش چیلرهای سرمایشی که در بخش خانگی، تجاری و صنعتی استفاده می‌شوند، به جای استفاده از مبردهای R۴۱۰A، R۴۰۷C، R۴۰۴A، R۳۲، R۱۳۴a، R۵۰۷، می‌توان از مبردهای R۷۱۷ و یا هیدروکربن‌هایی مانند R۲۹۰ و R۱۲۷۰ به عنوان مبردهایی با پتانسیل گرمایش جهانی پایین و بازده‌های انرژی بسیار بالا استفاده کرد. در بخش سرمایش در سامانه‌های خانگی و مستقل تجاری و واحدهای کندانس تجاری، به جای استفاده از مبردهای R۴۱۰A و R۱۳۴a می‌توان از مبردهای R۶۰۰a و R۲۹۰ استفاده کرد. در بخش سامانه‌های سرمایش در حمل و نقل نیز استفاده از مبرد جایگزین R۲۹۰ به جای استفاده از مبرد فعلی R۴۰۷C توصیه می‌شود. یکی از جایگزین‌های مناسب در تهویه مطبوع خودروها استفاده از مبردهای HFO۱۲۳۴ yf به جای استفاده از مبرد فعلی R۱۳۴a می‌باشد. اما به دلیل نگرانی‌های مربوط به اشتعال‌پذیری، استفاده از هیدروکربن‌ها در میان خودروسازان توصیه نشده است.

مدل اثر متقابل و هم‌افزایی گازهای گلخانه‌ای و آلایندگی هوا (GAINS، ۲۰۰۵) یک مدل ارزیابی پتانسیل و هزینه‌های کنترل آلایندگی هوا و کاهش گازهای گلخانه‌ای است. در این مدل هزینه‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای فلوئوردار از جمله گازهای HFC بر اساس داده‌های موجود برای برخی از کشورها از جمله کشورهای AnnexI و برخی از کشورهای آسیایی محاسبه شده است. کشور ایران جزو این مدل محاسباتی نیست اما روش‌ها و هزینه کلی کنترل انتشار در این مدل برای کشور ایران مطابق با جدول ۶ قابل استفاده است.

SF_6: به‌طورکلی از راهکارهای کاهش انتشار گاز SF_6 در سامانه‌های الکتریکی می‌توان به بهبود دائمی در طراحی پست‌های برق به‌منظور حداقل کردن میزان نشت در طول عمر تجهیزات، کاهش انتشار در مدت‌زمان تولید تجهیزات، بهبود تجهیزات مورداستفاده در کنترل گاز، بهبود روش پر کردن گاز، نظارت بهتر در تعمیرات، تعمیر و یا تعویض

تجهیزات قدیمی موجود با مشکل نشت شناخته‌شده، بهبود دستورالعمل‌های تعمیر و نگهداری، بهبود روش‌های بازیافت گاز در تجهیزات اسقاطی و اطمینان از مجاز بودن استفاده مجدد از SF_6 طبق استانداردهای IEC[10] و ترویج استفاده از آن اشاره کرد. به طورکلی برای مدیریت انتشار گاز SF_6 باید چرخه عمر آن مدیریت شود. بدین‌ترتیب این اطمینان حاصل خواهد شد که موجودی این گاز ردیابی ، نشتی‌ها شناسایی و ترمیم شوند، این گاز به‌درستی از مدارشکن‌ها بازیابی شود، و در انتها بازیافت و از تجهیزات دفع شود.

جدول ۶- هزینه راهکارهای کاهش انتشار گاز SF_6 (GAINS، ۲۰۰۵)

نوع دستگاه	راهکار کاهش انتشار	بازده کاهش انتشار	حداکثر پتانسیل کاربرد	هزینه متوسط کاهش انتشار (یورو بر تن HFC)	هزینه متوسط کاهش انتشار (یورو بر تن معادل CO_2)
یخچال‌های صنعتی موجود	کنترل نشتی و بهبود قطعات	٪۴۲	٪۱۰۰	۳۹۲۶۶	۱۵/۱
	اصلاح سامانه مثل مبرد جایگزین	٪۱۰۰	٪۱۰۰	۵۵۳۸۳	۲۱/۳
یخچال‌های صنعتی اسقاطی	جمع‌آوری مبرد باقی‌مانده	٪۸۸	٪۸۰	۳۹۲۶۶	۱۵/۱
	اصلاح سامانه مثل مبرد جایگزین	٪۱۰۰	٪۶۷	۵۵۳۸۳	۲۱/۳
یخچال‌های تجاری موجود	کنترل نشتی و بهبود قطعات	٪۳۳	٪۱۰۰	۴۹۵۰۳	۱۸/۱
	اصلاح سیستم مثل مبرد جایگزین	٪۱۰۰	٪۸۰	۶۷۰۱۶	۲۴/۶
یخچال‌های تجاری اسقاطی	جمع‌آوری مبرد باقی‌مانده	٪۸۰	٪۱۰۰	۴۹۵۰۳	۱۸/۱
	اصلاح سامانه مثل مبرد جایگزین	٪۱۰۰	٪۸۰	۶۷۰۱۶	۲۴/۶
سرمایش در حمل و نقل موجود	مبرد جایگزین: مبرد CO_2	٪۸۰	٪۱۰۰	۴۰۰۰	۲/۰
	کنترل نشتی و بهبود قطعات	٪۱۰۰	٪۵۰	۳۵۶۳۲	۱۷/۸
سرمایش در حمل و نقل اسقاطی	مبرد جایگزین: مبرد CO_2	٪۲۰	٪۱۰۰	۴۰۰۰	۲/۰
	جمع‌آوری مبرد باقی‌مانده	٪۱۰۰	٪۵۰	۳۵۶۳۲	۱۷/۸
دستگاه تهویه مطبوع موجود	کنترل نشتی و بهبود قطعات	٪۱۰۰	٪۱۰۰	۶۳۳۰۲	۳۸/۹
	اصلاح سامانه مثل مبرد جایگزین	٪۳۰	٪۱۰۰	۸۱۰۵۴	۴۹/۸
دستگاه تهویه مطبوع اسقاطی	جمع‌آوری مبرد باقی‌مانده	٪۱۰۰	٪۶۷	۶۳۳۰۲	۳۸/۹
	اصلاح سامانه مثل مبرد جایگزین	٪۸۸	٪۱۰۰	۸۱۰۵۴	۴۹/۸
یخچال‌های خانگی اسقاطی	جمع‌آوری مبرد باقی‌مانده	٪۸۰	٪۱۰۰	۱۹۰۲۶	۱۴/۶
تهویه مطبوع وسایل نقلیه موجود	جایگزینی HFC-134a با CO_2 فشرده	٪۱۰۰	٪۱۰۰	۳۳۲۶۴	۲۵/۶
	کنترل نشتی و بهبود قطعات	٪۵۰	٪۱۰۰	۲۹۵۱۶	۲۲/۷
تهویه مطبوع وسایل نقلیه اسقاطی	جایگزینی HFC-134a با CO_2 فشرده	٪۱۰۰	٪۱۰۰	۳۳۲۶۴	۲۵/۶
	جمع‌آوری مبرد باقی‌مانده	٪۸۰	٪۱۰۰	۲۹۵۱۶	۲۲/۷

یک راهکار اساسی برای کاهش انتشار در ریخته‌گری منیزیم، استفاده از مواد جایگزین مانند SO_2 است. ازآنجایی‌که SF_6 نسبت به SO_2 بسیار گران‌قیمت‌تر می‌باشد، این احتمال وجود دارد که هزینه‌های تعمیر و نگهداری پس از این جایگزینی تقریباً ثابت بماند. همچنین در بسیاری از موارد می‌توان با بهبود مدیریت در فرآیند ریخته‌گری با هزینه‌های بسیار کم، کاهش چشمگیری در استفاده از SF_6 داشت.

خلاصه‌ای از راهکارهای کاهش انتشار گاز SF_6، بازده کاهش و هزینه‌های مرتب بر آن مطابق با مدل GAIN در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- هزینه راهکارهای کاهش انتشار گاز SF_6 (GAINS، ۲۰۰۵)

منابع انتشار	راهکار کاهش انتشار	بازده کاهش انتشار	حداکثر پتانسیل کاربرد	هزینه متوسط کاهش انتشار (یورو بر تن SF_6)	هزینه متوسط کاهش انتشار (یورو بر معادل تن CO_2)
تجهیزات الکترونیکی	کنترل نشتی‌ها و جمع‌آوری و بازیافت SF_6	٪۸۴	٪۱۰۰	۸۶۰۴۰	۳/۶
ریخته‌گری منیزیم	استفاده از گاز جایگزین SO_2	٪۱۰۰	٪۱۰۰	۲۳۹۰	۰/۱
سایر منابع	ممنوعیت استفاده	٪۱۰۰	٪۱۰۰	۴۷۸۰	۰/۲

با توسعه و گسترش نیروگاه‌ها و شبکه‌های انتقال و توزیع برق در کشور، تعداد پست‌های انتقال و توزیع نیز افزایش یافته و متناسب با نوع پست از نظر عایق مصرفی، میزان SF_6 مصرفی نیز افزایش می‌یابد. همچنین مزایای مختلف پست‌های GIS موجب گسترش و در مواردی جایگزینی پست‌های معمولی با آن‌ها می‌شود. این در حالی است که میزان به کارگیری SF_6 در پست‌های GIS بسیار بیشتر از پست‌های معمولی است. افزایش مصرف این گاز در صنعت برق کشور، افزایش انتشار آن در آینده را به دنبال دارد. در حال حاضر شرکت شمش فلز رویال به عنوان تنها واحد تولیدکننده منیزیم کشور، از گازهایی چون گاز نیتروژن در ریخته‌گری منیزیم استفاده می‌کند. مزایای فرایندی استفاده از گاز SF_6 نسبت به سایر گازها موجب ترغیب این شرکت در جهت جایگزینی گاز نیتروژن با این گاز در آینده‌ای نزدیک شده است. درصورت استفاده از گاز SF_6 در صنعت منیزیم، انتظار می‌رود انتشار این گاز در ایران افزایش یابد.

PFC: گازهای PFC به‌عنوان محصولات جانبی در فرایند تولید آلومینیوم در طول وقوع اثر آندی شکل می‌گیرند. این اثرات آندی علاوه بر اینکه باعث انتشار گازهای PFC می‌شوند، بازده تولید آلومینیوم را نیز کاهش می‌دهند. میزان انتشار PFC در هر تن آلومینیوم تولیدشده به فرکانس اثرات آند و مدت‌زمان این اثر بستگی دارد. فرکانس و مدت‌زمان این اثر آندی عمدتاً به فنّاوری پیل‌ها و عملیات فرآیندی بستگی دارد. در نتیجه بسته به این پارامترها، انتشار این گازها از یک کارخانه تا کارخانه دیگر متفاوت می‌باشد. استفاده از فناوری تغذیه نقطه‌ای و تنظیم خوراک با استفاده از کنترل رایانه‌ای راهکاری مناسب برای بهبود روش‌های تغذیه آلومینا است. با توجه به ضرایب انتشار بالا برای دو فناوری SWPB و VSS، دو راهکار برای کاهش انتشار این گازها بازنگری و بهبود این فناوری‌ها و یا تبدیل این دو فناوری به فناوری PFPB (تغذیه نقطه‌ای) که ضریب انتشار بسیار کوچکی دارد، می‌باشد. تغذیه نقطه‌ای شامل افزودن مقدار کمی آلومینا (در حدود یک کیلوگرم) در فواصل مختلف کوتاه - معمولاً کمتر از یک دقیقه می‌باشد. در حال حاضر این روش بهترین روش تغذیه آلومینا می‌باشد (TNC، ۲۰۱۷). این فناوری امکان تغذیه با نظم بیشتر را در فواصل کنترل‌شده فراهم می‌کند و یک فرآیند عملیاتی با اثرات آند کمتر را ایجاد می‌کند. حرکت به سمت چنین فناوری نه‌تنها انتشارات PFC را کاهش می‌دهد بلکه کارایی فرآیند تولید را نیز بهبود می‌بخشد. راهکار دیگر استفاده از کنترل‌های پیشرفته کامپیوتری برای بهینه‌سازی عملکرد پیل‌ها و نظارت بر پارامترهای مختلفی است که در ایجاد اثر آندی نقش دارند. بدین‌ترتیب به اپراتورهای سامانه قبل از اینکه اثر آندی رخ دهد، هشدار داده می‌شود و در نتیجه فرکانس اثر آندی کاهش می‌یابد. یکی دیگر از راهکارهای کاهش انتشارات تبدیل فناوری‌های CWPB، SWPB، PFPB و VSS به فناوری‌های جدید می‌باشد. این فناوری‌های جدید شامل کاتد تخلیه‌شده مرطوب[۱۱]، آندهای بی‌اثر[۱۲]، کاهش کربوترمیک[۱۳]و احیای کائولونیت[۱۴]می‌باشند. این فناوری‌ها به زیرساخت‌هایی نیاز دارند که هم‌اکنون در اکثر کشورهای جهان در دسترس نیست (Purohit و Höglund-Isaksson، ۲۰۱۷).

برای کاهش انتشار در صنایع الکترونیک باید در فرایند تمیز کردن محفظه رسوب‌دهی بخار شیمیایی انتشار را کنترل نمود. استفاده از NF_3 به‌جای C_2F_6 به دلیل کارایی بالاتر در محفظه رسوب‌دهی، پتانسیل قابل‌توجهی را برای کاهش انتشار فراهم می‌کند. علاوه بر این استفاده از این گاز باعث افزایش سرعت فرآیند می‌شود که درنتیجه آن کارخانه می‌تواند صرفه‌جویی قابل‌توجهی در زمان پردازش داشته باشد و هزینه‌های راه‌اندازی و عملیاتی کاهش می‌یابد. جریان گاز باید از اتاق محفظه جمع‌آوری شود زیرا این گازها سمی هستند و نباید انتشار یابند. استفاده از این گاز در تمیز کردن محفظه فرآیند رسوب‌دهی بخار شیمیایی نه‌تنها انتشارات گازهای PFC را کاهش می‌دهد، بلکه ازآنجایی‌که تقریباً ۹۹ درصد از این گاز قبل از ورود به فرآیند از نظر شیمیایی تجزیه می‌شود و دوباره ترکیب نمی‌شود، میزان انتشار NF_3 در آن نیز بسیار اندک می‌باشد. در این روش به دلیل افزایش توان عملیاتی تجهیزات، میزان معادل دی‌اکسیدکربن تولیدشده را می‌توان تا ۹۹ درصد کاهش داد. البته پیاده‌سازی این روش بر روی تجهیزات قدیمی امکان‌پذیر نیست و فقط می‌توان این جایگزینی را روی تجهیزات جدید انجام داد (Harnisch و Hendriks، ۲۰۰۰). از دیگر راهکارها بهینه‌سازی فرآیند می‌باشد که بر تمیز کردن محفظه رسوب‌دهی بخار شیمیایی متمرکز است، چراکه این فرآیند به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع انتشار گازهای PFC در طول تاریخ شناخته شده است. همچنین به دلیل آن‌که این فرآیندها در غیاب ویفرها رخ می‌دهند می‌توانند بدون تأثیر منفی بر بازده محصول بهینه شوند. در بهینه‌سازی فرآیند، یافتن نقطه پایانی برای نظارت بر انتشار گازهای PFC مورداستفاده قرار می‌گیرد و درنتیجه زمان‌های پایان پاک‌سازی را ارائه می‌دهد که با تنظیم پارامترهای فرآیند مانند فشار محفظه، دما، سرعت جریان گاز پاک‌کننده پلاسما و نسبت گازها در مخلوط به حداقل می‌رسند. این پاک‌سازی‌ها به‌منظور به حداقل رساندن مصرف گاز بهینه می‌شوند که درنتیجه مصرف گاز کمتر هزینه‌ها نیز کاهش می‌یابند. بهینه‌سازی فرآیند می‌تواند میزان انتشار را در مقایسه با فرآیندهای بهینه نشده از ۱۰ تا ۵۶ درصد کاهش دهد. این روش کاهش انتشار بسیار کم‌هزینه می‌باشد. می‌تواند میزان انتشار را در فرآیندهای قدیمی را کاهش دهد و اطمینان ایجاد کند که در فرآیندهای جدید مصرف گاز حداقل است (ESIA، ۲۰۱۰).

خلاصه‌ای از راهکارهای کاهش انتشار گازهای PFC، بازده کاهش و هزینه‌های مرتب بر آن مطابق با مدل GAINS در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸ – هزینه راهکارهای کاهش انتشار گازهای PFC (GAINS، ۲۰۰۵)

راهکار کاهش انتشار	بازده کاهش انتشار	حداکثر پتانسیل کاربرد	هزینه متوسط کاهش انتشار (یورو بر تن PFC)	هزینه متوسط کاهش انتشار (یورو بر معادل تن CO_2)
صنعت آلومینیوم				
تغییر فناوری SWPB به PFPB	٪۹۲	٪۱۰۰	۲۵۵۲۴۳	۳۹/۳
بهینه‌سازی فناوری SWPB	٪۲۶	٪۱۰۰	۴۶۱۲۹	۷/۱
تغییر فناوری VSS به PFPB	٪۹۷	٪۱۰۰	۱۸۲۵۳	۲/۸
بهینه‌سازی فناوری VSS	٪۲۶	٪۱۰۰	۸۸۱۸	۱/۴
صنایع الکترونیک				
جایگزینی گازهای PFC با NF_3	٪۹۹	٪۱۰۰	۱۶۹۰۰۰	۲۶

از آن‌جا که مأموریت اصلی صنعت آلومینیوم ایران در افق چشم‌انداز ۱۴۰۴، دستیابی به مقام برتر در صنعت آلومینیوم در آسیای جنوب غربی، جایگاه سوم در آسیا و قرار گرفتن در زمره ۱۰ کشور اصلی تولیدکننده آلومینیوم

در جهان است، صنعت آلومینیوم سهمی مناسب در توسعه صادرات غیرنفتی کشور خواهد داشت. با افزایش میزان تولید آلومینیوم کشور انتظار می‌رود، انتشار گازهای PFC ناشی از این صنعت نیز افزایش یابد. اما با توجه به پیاده‌سازی فناوری PFBP در خطوط جدید و همچنین جایگزینی فناوری خطوط قدیمی با این فناوری، میزان انتشار این گازها کاهش خواهد یافت. همچنین تلاش‌های پراکنده‌ای برای بومی‌سازی صنعت الکترونیک و نیمه‌هادی‌ها از جمله تأسیس شرکت‌هایی در بخش عمومی و بخش نظامی انجام شده است. این شرکت‌ها با کمک شرکت‌های خارجی طیفی از محصولات الکترونیکی را تولید کرده‌اند که برخی از محصولات آن‌ها نیز مونتاژ بوده است. می‌توان ادعا کرد ایران در این بخش به صورت تجاری توفیق چندانی نداشته است. این صنعت در ایران به دلیل نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد که از توان بخش خصوصی خارج است و زمان بازگشت سرمایه طولانی، نیازمند حمایت دولتی است. در حال حاضر نیروگاه‌های فتوولتائیک مختلف در کشور با مشارکت شرکت‌های بین‌المللی و داخلی احداث شده است. توسعه فناوری سیلیکونی کریستالی در داخل کشور از طریق حمایت و تشویق صنایع توانمند داخلی با همکاری فعالانه با پیشگامان این فناوری در دنیا از راهبردهای کلان در بخش فتوولتائیک است (Roadmap of Solar Energy، ۲۰۱۵). راهبردهای توسعه‌ای کشور در صنایع الکترونیک شامل نیمه‌هادی‌ها و سلول‌های فتوولتائیک، می‌تواند منجر به افزایش انتشار این گازها در این بخش شود.

NF_3: با توجه به پتانسیل بالای ایران در دریافت مناسب تابش خورشید و مزیت‌های زیست‌محیطی، امنیتی، اقتصادی و اجتماعی بهره‌برداری از این انرژی، سند راهبرد ملی برای توسعه فناوری‌های مرتبط با بخش برق انرژی خورشیدی در ایران تدوین شده است. از اهداف تعیین شده برای تحقق چشم‌انداز این سند، دستیابی به جایگاه اول در تولید صنعتی بومی و رقابت‌پذیر فناوری‌های حرارتی خورشیدی و فتوولتائیک و دستیابی به حداقل یک شرکت معتبر بین‌المللی در حوزه ساخت پنل فتوولتائیک است. رهنگاشت‌های توسعه فناوری‌های انرژی خورشیدی کشور شامل اقدامات توسعه نظام نوآوری فناوری‌های انرژی خورشیدی (اقدامات غیرفنی) و نیز اقدامات توسعه فناوری‌های انرژی خورشیدی (اقدامات فنی) است، که به تفکیک برای هر یک از فناوری‌های اولویت‌دار خورشیدی از جمله فناوری فتوولتائیک نسل اول و دوم و فناوری‌های نوین فتوولتائیک مشخص شده است. لازم به ذکر است که توسعه فناوری سیلیکونی کریستالی در داخل کشور از طریق حمایت و تشویق صنایع توانمند داخلی با همکاری فعالانه با پیشگامان این فناوری در دنیا و توسعه فناوری‌های نسل نوین از طریق توسعه درون‌زا و تکیه بر دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و شرکت‌های دانش بنیان داخلی از راهبردهای کلان در بخش فتوولتائیک است (Roadmap of Solar Energy، ۲۰۱۵). با توجه به راهبردها و اقدامات توسعه‌ای کشور در صنایع الکترونیک شامل نیمه‌هادی‌ها و سلول‌های فتوولتائیک، استفاده از گاز NF_3 در این صنایع می‌تواند منجر به انتشار این گاز در کشور شود.

راهکارهای کاهش انتشار این گاز در سه دسته اصلی تجهیزات الکترونیکی (نیمه‌هادی‌ها، صفحه نمایش‌های مسطح –ترانزیستور لایه نازک و سلول‌های فتوولتائیک) به صورت خلاصه عبارتند از: استفاده از مواد جایگزین مانند فلوئور، بهینه‌سازی فرآیند تمیز کردن محفظه رسوب‌دهی بخار شیمیایی ، بازیافت و استفاده مجدد از گاز و استفاده از فناوری‌های تخریب گاز.

گاز فلوئور از جمله مواد جایگزین پیشنهادی برای گاز NF_3 است. از مزایای این گاز می‌توان به پتانسیل گرمایش جهانی برابر با صفر و طول عمر کوتاه آن در اتمسفر اشاره کرد. اما سمی بودن و واکنش‌پذیری بالا از معایب گاز فلوئور است و برای تولید آن باید از تجهیزات ویژه‌ای استفاده کرد. مطابق با تجربیات شرکت Linde که یکی از بزرگترین تولیدکنندگان گازهای صنعتی است، گاز فلوئور

در تمیزکردن محفظه رسوب‌دهی در تولید سلول‌های خورشیدی لایه نازک به دلیل زمان کمتر پاک‌سازی و در نتیجه افزایش قابل توجه بهره‌وری، کارایی بالایی دارد. Malibu اولین کارخانه تولید سلول‌های خورشیدی لایه نازک در جهان است که استفاده از گاز NF_3 را از فرآیند تولید خود به طور کامل حذف کرده است. تحقیقات نشان می‌دهد که گاز فلوئور نه تنها به عنوان یک عامل تمیزکننده عمل می‌کند، بلکه سرعت پاک‌سازی آن نیز نسبت به گاز NF_3 بالاتر است و باعث کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. استفاده از این گاز سرعت پاک‌سازی را به میزان ۵۰ درصد و توان عملیاتی خط تولید را به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌دهد. نرخ پاک‌سازی این گاز در شرایط یکسان تقریباً سه برابر بیشتر از گاز NF_3 است. این میزان افزایش سرعت پاک‌سازی باعث افزایش بهره‌وری ۴ درصدی خطوط تولید فیلم‌های لایه نازک و افزایش سود سالیانه شده است (Matz، ۲۰۰۸). همچنین بهینه‌سازی فرآیند و یافتن زمان پاک‌سازی کوتاه می‌تواند میزان انتشار را در مقایسه با فرآیندهای بهینه نشده از ۱۰ تا ۵۶ درصد کاهش دهد (ESIA، ۲۰۱۰).

نتیجه‌گیری

عمده مصرف گازهای HFC در کشور ایران (مانند سایر کشورهای جهان) مربوط به بخش تبرید و تهویه مطبوع است. مطابق با دستورالعمل IPCC، برای محاسبه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در سامانه‌های تبرید و تهویه مطبوع، باید از روش سطح دو استفاده کرد. داده‌های لازم برای استفاده از روش Tier 2 عبارت از داده‌های فعالیت بر اساس نوع تجهیز و نوع مبرد طی زمان و داده‌های ضرایب انتشار است. وضعیت اطلاعات موجود در مورد انتشار گازهای HFC ناشی از سامانه‌های تبرید و تهویه مطبوع در ایران محدود به گزارشی در سال ۲۰۱۵ است. در این گزارش تعداد دستگاه‌های تولیدی و وارداتی سامانه‌های مختلف تبرید و تهویه مطبوع از سال ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۵ از شرکت‌های مرتبط جمع‌آوری شده است. با استفاده از نرخ رشد این تجهیزات در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۶ که در این گزارش آمده است، می‌توان تعداد تجهیزات را با تقریب به‌روزرسانی کرد. در حال حاضر ضرایب انتشار ملی در کشور ایران بر اساس اطلاعات تولیدکنندگان تجهیزات تبرید و تهویه مطبوع، شرکت‌های خدماتی و مراکز اسقاط تجهیزات در دسترس نیست؛ با تهیه ضرایب ملی می‌توان دقت محاسبات انتشار و در نتیجه اتخاذ راهکارهای مناسب برای کاهش انتشار را بهبود بخشید. در شرایطی که امکان تهیه ضرایب ملی میسر نباشد، باید از ضرایب انتشار پیش‌فرض طبق دستورالعمل IPCC بهره برد. این مقادیر با توجه به شرایط بین‌المللی تولید و استفاده از تجهیزات برای کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه گزارش شده است.

عمده مصرف گاز SF_6 در کشور ایران مربوط به تجهیزات الکتریکی است. مطابق با دستورالعمل IPCC، داده‌های لازم برای استفاده از روش سطح یک عبارت از میزان SF_6 مصرفی توسط تولیدکنندگان تجهیزات، ظرفیت اسمی تجهیزات جدید، ظرفیت تجهیزات در حال استفاده، ظرفیت تجهیزات اسقاطی و داده‌های ضرایب قراردادی انتشار است. در حال حاضر ضرایب انتشار ملی در کشور ایران بر اساس اطلاعات تولیدکنندگان تجهیزات الکتریکی، شرکت‌های خدماتی و مراکز اسقاط تجهیزات در دسترس نیست.

عمده انتشار گازهای PFC در کشور ایران مربوط به تولید آلومینیوم اولیه است. مطابق با دستورالعمل IPCC، داده‌های لازم برای استفاده از روش سطح یک عبارت از میزان تولید آلومینیوم و داده‌های ضرایب قراردادی انتشار است. در حال حاضر ضرایب انتشار ملی در کشور ایران در صنعت آلومینیوم در دسترس نیست. چنانچه اطلاعات مربوط به فناوری مورداستفاده در شرکت‌های تولیدکننده آلومینیوم و همچنین داده‌های ظرفیت تولید و میزان پردازش بسترهای الکترونیکی شرکت‌های فعال در صنایع الکترونیک در کشور در اختیار باشد، با برنامه‌ریزی برای

محاسبه دقیق ضرایب انتشار ملی و نیز صحه‌گذاری بر داده‌های فعالیت، محاسبات انتشار به‌صورت متقن قابل انجام است.

گاز NF_3 همچون سایر گازهای حاوی فلوئور در ایران تولید نمی‌شود و با توجه به اطلاعات موجود این گاز به ایران وارد نمی‌شود. بنابراین با وجود اینکه اطلاعی از نوع گاز مصرفی در صنایع الکترونیک ایران در دسترس نیست، می‌توان نتیجه گرفت که در این صنایع از گاز NF_3 استفاده نمی‌شود. در حال حاضر نیاز به داده‌های فعالیت برای صنعت الکترونیک شامل داده‌های مربوط به فروش و استفاده از گاز در شرکت‌های تولید نیمه‌هادی‌ها، صفحه‌های نمایش مسطح و سلول‌های فتوولتائیک و نوع گاز مصرفی در این صنایع می‌باشد. در کشور ایران کدهای تعرفه گمرکی برای مواد شیمیایی حاوی فلوئور به‌صورت کلی (و نه به‌صورت تفکیکی) پیاده‌سازی شده‌اند. بنابراین نیاز به داده‌های واردات گاز NF_3 مستقل از سایر مواد شیمیایی حاوی فلوئور است.

از جمله محدودیت‌ها برای ارزیابی موجودی ملی این گازها می‌توان به عدم اطمینان از داده‌ها و مستندات موجود، عدم توسعه ضرایب انتشار ملی، کمبود ظرفیت‌های آماری، نبود ابزار و فناوری‌های اندازه‌گیری، دانش و ظرفیت محدود سازمان‌ها و بخش‌های مختلف اشاره کرد. به‌منظور برطرف کردن این محدودیت‌ها نیازمند اقداماتی نظیر توسعه داده‌ها و فناوری‌ها، ایجاد سازوکارهای مالی و ابزارهای فنی برای حمایت از اقدامات لازم، ایجاد ظرفیت برای ذینفعان مربوطه و افزایش دانش و آگاهی آن‌ها، توسعه سیستم‌های اندازه‌گیری، گزارش و تأیید و نظارت در سطوح مختلف است.

تشکر و قدردانی

تحقیق حاضر در چهارچوب طرح پایداری اقلیم تحت نظارت و حمایت مالی برنامه توسعه ملل متحد (UNDP) و با مدیریت سازمان حفاظت محیط زیست انجام شده است.

یادداشت‌ها

1. Hydrofluorocarbons (HFCs)
2. Sulfur Hexafluoride (SF_6)
3. Perfluorocarbons (PFCs)
4. Nitrogen Trifluoride (NF_3)
5. Gas Insulating Substation (GIS)
6. Air Insulating Substation (AIS)
7. Minimum Energy Performance Standard (MEPS)
8. Combined Cooling Heating and Power (CCHP)
9. Variable Refrigerant Flow (VRF)
10. International Electrotechnical Commission
11. Wetted drained cathodes
12. Inert anodes
13. Carbothermic reduction
14. Kaolinite reduction

فهرست منابع

Fthenakis, V. & Clark, D.O. (2010). Life-cycle nitrogen trifluoride emissions from photovoltaics, *Environmental Science & Technology*. 44(22): p. 8750-8757.

Ghadimi, M. (November 2006). *SF_6 inventory and consumption in Iran's electric power industry, comparison with world, and necessity of gas recovery systems*, 21th International Power System Conference, Tehran, Iran.

Harnisch, J. & Hendriks, C. (2000). Economic evaluation of emission reductions of HFCs, PFCs and SF_6 in Europe.

https://di.unfccc.int/detailed_data_by_party, Accessed 19 March 2021.

https://ghgprotocol.org/blog/nitrogen-trifluoride-now-required-ghg-protocol-greenhouse-gas-emissions-inventories, Accessed 19 March 2021.

https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/software/index.html, Accessed 20 May 2021.

IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Emissions of fluorinatedsubstitutes for ozonedepleting substances, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES 2006.

IPCC, Climate Change: Synthesis Report, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Contribution of Working Groups I, Geneva, Switzerland, 2014.

Martin-Torres, F.J. (2020). What is Nitrogen trifluoride (NF_3)?, Scientific Brief.

Matz, M. (2008). A new study suggests that fluorine gas is a compelling alter native to nitrogen trifluoride, a potent greenhouse gas widely used by thin-film silicon producers for PECVD chamber cleaning.

NAMAs in the refrigeration, air conditioning and foam sectors. A technical handbook Module 1 – Inventory, Jonathan Heubes and Irene Papst, 2014.

National Strategy Document and Roadmap for the Development of Solar Energy Related Technologies in Iran, Niroo Research Institute, 2015.

Nitrogen trifluoride & fluorine gas market size, Share & trends analysis report by application, by region, 2015-2020, Grand View Research, 2015.

Overview of HFC Market Sectors, Fact Sheets on HFCs and Low GWP Alternative, UNEP Ozone Secretariat, 2015.

Prather, M.J. & Hsu, J. (2008). NF_3, the greenhouse gas missing from Kyoto, Geophysical Research Letters. 35(12).

Purohit, P. & Höglund-Isaksson, L. (2017). Global emissions of fluorinated greenhouse gases 2005–2050 with abatement Potentials and costs, Atmospheric Chemistry and *Physics*. 17: p. 2795–2816.

Refrigeration and Air Conditioning Greenhouse Gas Inventory for Iran (RAC), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH in cooperation with Ozone Layer Protection Unit (NOU) at the Department of the Environment (DOE), 2018.

Scientific Assessment of Ozone Depletion, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 58, 2018.

The European semiconductor industry's voluntary agreement to reduce 'perfluorocompound' emission, European Semiconductor Industry Association (ESIA), 2010.

The GAINS Model for Greenhouse Gases - Version 1.0: HFC, PFC and SF_6. IIASA Interim Report IR-05-56, Antti Tohka, IIASA, Laxenburg, Austria, 2005.

Third National Communication (TNC) (for Iran), December 2017.