

مقایسه انتشار گازهای گلخانه‌ای در انواع نیروگاه‌های برق با استفاده از رویکرد LCA

نرگس کارگری^{۱*}، رضا مستوری^۲

تاریخ دریافت مقاله:

۸۹/۳/۳

تاریخ پذیرش مقاله:

۸۹/۵/۱

چکیده:

هیچیک از سامانه‌های تولید برق فاقد اثرات زیست محیطی نیستند. اثرات زیست محیطی در کل مراحل زنجیره تولید انرژی برق شامل استخراج منابع، ساخت تجهیزات، حمل و نقل مواد، استفاده از برق و دفع زائدات رخ می‌دهد. برخی از اثرات عمده زیست محیطی همراه با تولید برق شامل آلودگی هوا (انتشار آلاینده‌های CO , NOx , SO_2 , PM_{10} ، آلاینده‌های سمی نظیر جیوه و غیره)، انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از زمین، اثر بر اکوسیستم (فون و فلور)، اثر بر سلامت انسان می‌باشد. استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات^۱ (LCA) به خوبی می‌تواند اثرات زیست محیطی در کلیه مراحل چرخه حیات تولید برق را مشخص کند. همچنین با استفاده از LCA می‌توان روش‌های مختلف تولید برق را از دیدگاه‌های زیست محیطی با یکدیگر مقایسه نمود. با توجه به اهمیت موضوع انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییر اقلیم^۲ در این مقاله به مقایسه انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات فناوری‌های مختلف تولید برق (شامل نیروگاه‌های با سوخت فسیلی، نیروگاه‌های هسته‌ای، نیروگاه‌های فتوولتائیک، نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌های برق آبی و نیروگاه‌های زیست توده) پرداخته شده است.

کلمات کلیدی:

ارزیابی چرخه حیات (LCA)،
تغییر اقلیم، گازهای گلخانه‌ای،
نیروگاه‌های برق

۱) عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان

۲) عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک

* (نویسنده مسئول) kargari@tiau.ac.ir

^۱ Life Cycle Assessment

^۲ Climate Change

مقدمه

با افزایش نگرانی‌ها در خصوص تغییر اقلیم، درک مناسب از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از نیروگاه‌های مختلف تولید برق با دیدگاه محیط زیستی ضروری است. همه سامانه‌های انرژی انتشار گازهای گلخانه‌ای را به همراه دارند و به این ترتیب در تغییر اقلیم انسان ساخت شرکت خواهند داشت. امروزه مشخص شده است که انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از استفاده از فناوری انرژی خاصی نیاز به اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای در همه مراحل فناوری و چرخه سوخت آن دارد [۵].

ارزیابی چرخه حیات یک ارزیابی زیست محیطی از کلیه مراحل تولید یک محصول است. هدف آن، جلوگیری از ارائه تصویر اشتباه محصولات از طریق در نظر گرفتن اثرات مهم زیست محیطی می‌باشد. در بخش برق، ارزیابی باید شامل استخراج، فرآوری، انتقال سوخت، ساخت نیروگاه، تولید برق، دفع زائدات، نوسازی و تخریب نیروگاه پس از عمر آن باشد. اگرچه، در عمل برخی مراحل مانند نوسازی و یا تخریب نیروگاه پس از عمر آن به طور جزئی بررسی نمی‌شوند [۱۱].

گازهای گلخانه‌ای و تغییر اقلیم

یکی از نگرانی‌های عمده زیست محیطی به ویژه در دستیابی به توسعه پایدار، انتشار دی اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. گازهای گلخانه‌ای اولیه عبارتند از: دی اکسید کربن (CO_2)، متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O) [۶].

هیأت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) ^{۱۱} پیشنهادات زیر را در مورد اثرات زیست محیطی تغییر اقلیم مطرح نموده است [۶]:

- دمای بیشتر منجر به چرخه هیدرولوژیکی شدیدی می‌شود که در واقع موجب خشکسالی‌های شدید و / یا سیلاب در مناطق مختلف می‌شود.

- تغییر اقلیم سریع می‌تواند توازن بین گونه‌ها را تغییر دهد و حتی موجب مرگ جنگل‌ها شود.
- مدل‌ها نشان می‌دهند که سطح دریاهای تا سال ۲۱۰۰ نسبت به وضعیت کنونی ۵۰ سانتیمتر افزایش خواهد یافت.
- پیش‌بینی تغییر اقلیم سریع، وسیع و غیر قابل انتظار آینده بسیار مشکل است.

تغییر اقلیم یک مشکل جهانی در ناحیه پیچیده‌ای از اثر متقابل بین فرآیندهای اقلیمی، زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فناوری است. اثرات تغییر اقلیم در یک افق طولانی مدت آشکار می‌شود و فعالیت‌های کنونی بشر، توسعه پایدار را تحت تاثیر قرار خواهد داد. انتشار گازهای گلخانه‌ای انسان ساخت در بیوسفر عامل اصلی تغییر اقلیم محسوب می‌شوند. به خاطر اثرات بالقوه، بسیاری از مطالعات بر ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای سامانه‌های انرژی تأکید کرده‌اند. این مطالعات داده‌هایی در مورد انتشار معادل CO_2 تولید می‌کنند. به این مفهوم که CO_2 و سایر گازهای گلخانه‌ای در ارزیابی در نظر گرفته می‌شوند. اما سایر گازهای گلخانه‌ای اثرات متفاوتی بر اقلیم دارند و ممکن است عمر جوی متفاوتی نیز داشته باشند. به منظور به حساب آوردن این تفاوت‌ها، IPCC شاخص‌های "پتانسیل گرمایش جهانی" (GWP) ^{۱۲} را ارائه کرده است. در مطالعات LCA هر گاز گلخانه‌ای به معادل CO_2 تبدیل شده و به فهرست موجودی اضافه می‌شود. جدول (۱) GWP گازهای گلخانه‌ای را نشان می‌دهد [۶].

¹¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

¹² Global Warming Potential

جدول ۸: GWP گازهای گلخانه ای [۶]

ردیف	گاز گلخانه ای	GWP (per Kg over 100 years)
۱	CO ₂	۱
۲	CH ₄	۲۱
۳	N ₂ O	۳۱۰
۴	CF ₄	۶۵۰۰
۵	C ₂ F ₆	۹۵۰۰

در بین سامانه های مختلف تولید برق، فناوری های مبتنی بر سوخت های فسیلی (زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی) بیشترین میزان انتشار CO₂ را به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی دارند [۵].

تولید برق و انتشار گازهای گلخانه ای

بخش برق، از مهمترین منابع انتشار گازهای گلخانه ای در سطح جهان می باشد. طبق محاسبات به عمل آمده، حدود ۳۷/۵ درصد انتشار کربن در سطح جهان ناشی از فعالیت های تولید برق می باشد. کاهش انتشار گازهای گلخانه ای از بخش برق، مستلزم استفاده از الگوهای مختلف انرژی برای تولید برق می باشد. مقایسه میزان انتشار گازهای گلخانه ای از فناوری های مختلف برق، به انتخاب روش های مؤثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای کمک می کند [۴].

ارزیابی چرخه حیات

ارزیابی چرخه حیات (LCA) ابزاری برای تجزیه و تحلیل اثرات زیست محیطی محصولات در همه مراحل چرخه حیات آنها - از استخراج منابع تا تولید مواد، تولید قطعات و تولید نهایی محصول و استفاده از محصول تا مدیریت پس از دفع آن شامل بازیافت، استفاده مجدد و دفع نهایی - (به عبارت دیگر رویکرد گهواره تا گور) می باشد [۳]. در ISO 14040 تعریف زیر در مورد LCA ارائه شده است:

"گردآوری و ارزیابی ورودی ها و خروجی های و اثرات بالقوه زیست محیطی یک سیستم محصول در طول چرخه حیات آن" واژه "محصول" در LCA با معنی گسترده ای شامل کالاهای فیزیکی و خدمات مورد استفاده قرار می گیرد و به طور کلی شامل کلیه کالاها و خدمات در سطح استراتژیک و کاربردی می شود. LCA تا حد امکان دارای ویژگی کمی است و اگر امکان دسترسی به اطلاعات کمی وجود نداشته باشد، می تواند جنبه های کیفی را در نظر بگیرد تا در حد امکان تصویر کاملی از اثرات زیست محیطی ایجاد کند [۳].

کاربردهای اصلی LCA در موارد زیر خلاصه می شود:

- تجزیه و تحلیل منشأ مشکلات مرتبط با یک محصول خاص
- طراحی محصولات جدید
- انتخاب بین چند محصول قابل مقایسه

البته کاربردهای مشابهی در سطح استراتژیک، در ارتباط با استراتژی های تجاری و سیاسی دولت ها می تواند مشخص شود. روش اجرای یک پروژه LCA بستگی به نوع استفاده از نتایج آن دارد [۳،۲].

تاریخچه ارزیابی چرخه حیات نیروگاه ها

برای اولین بار در دهه ۱۹۷۰، مطالعاتی در خصوص ارزیابی برای مقایسه گزینه های منابع انرژی بر اساس اثرات عمومی و بهداشت شغلی تولید برق انجام شد. ارزیابی های انجام شده چرخه کامل سوخت شامل استخراج، آماده سازی و حمل و نقل سوخت و تولید برق را در نظر گرفتند.

پس از بحران نفت در سال ۱۹۷۲، بسیاری از کشورهای صنعتی در دستیابی به سایر منابع انرژی تحقیقاتی را شروع کردند. به خصوص کشورهایی که به منابع انرژی فسیلی کمتری دسترسی داشتند، به توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر پرداختند [۱۱].

مقایسه نیروگاه های برق از دیدگاه LCA

تجزیه و تحلیل مقایسه ای سامانه های تولید برق می تواند به ازای واحد ظرفیت (مانند مقایسه سامانه هایی که ۱۰۰۰ مگاوات تولید برق دارند) انجام شود. اگرچه، برخی نیروگاه ها در تمام سال با ظرفیت کامل کار می کنند، در حالی که برخی نیروگاه ها با چنین فاکتور بالایی مورد بهره برداری قرار نمی گیرند. بنابراین مقایسه بر اساس ظرفیت نصب شده اغلب مناسب نیست. مقدار انرژی تولید شده (کیلوواتساعت) معیار مناسب تری برای مقایسه محسوب می شود که برای مطالعات LCA مناسب هستند. اگرچه، باید توجه داشت که حتی مقایسه بر اساس کیلوواتساعت دو مسئله مهم را در نظر نمی گیرد: سایر اهداف مخازن برقایی مانند آبیاری و کنترل سیل و پایایی ذخیره برق که یک مسئله پیچیده محسوب می شود [۱۱]. لازم به ذکر است، ارزیابی چرخه حیات نیروگاه های برق، گروه های مختلفی از اثرات زیست محیطی را علاوه بر انتشار گازهای گلخانه ای مانند اثر بر منابع زیستی و غیر زیستی، یوتروفیکاسیون، تولید اسید، تشکیل فتواکسیدان ها، کاهش ازن استراتوسفری، کاربری زمین و غیره در نظر می گیرد. اما در این مقاله تنها به مبحث ارزیابی چرخه حیات انتشار گازهای گلخانه ای نیروگاه ها پرداخته شده است.

ارزیابی انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات نیروگاه های برق

برای ارزیابی انتشار گازهای گلخانه ای فناوری های مختلف تولید برق می توان از ضریب انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات (LCE)^{۱۴} استفاده نمود. مقدار انتشار گازهای گلخانه ای در کل چرخه حیات تولید یک کیلووات ساعت برق به صورت زیر تعریف می شود [۵]:

$$LCE = \frac{\sum_i GWP_i \times (E_{fi} + E_{ci} + E_{oi} + E_{di})}{Q}$$

¹⁴ Life Cycle GHG Emission Factor

E_f : انتشار مستقیم ایجاد شده در اثر احتراق سوخت های فسیلی در نیروگاه ها

E_c : انتشار زمان ساخت نیروگاه ها

E_o : انتشار زمان بهره برداری و نگهداری نیروگاه ها

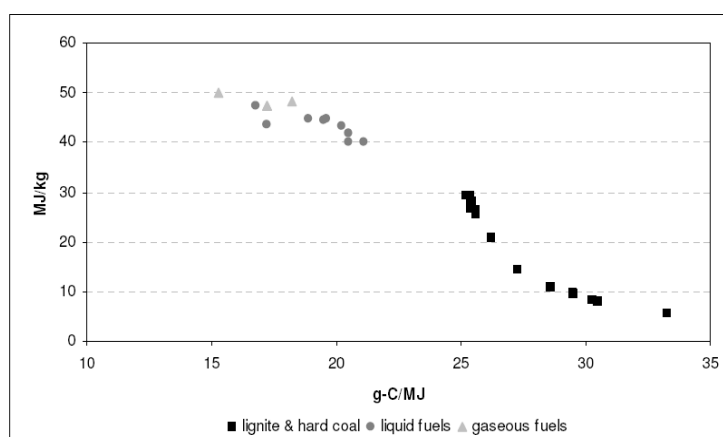
E_d : انتشار در زمان پایان عمر نیروگاه ها و از بین بردن نیروگاه ها

i: نوع گاز گلخانه ای

GWP: ضریب پتانسیل گرمایش جهانی هر یک از گازهای گلخانه ای

Q: خروجی خالص بر در طول عمر نیروگاه

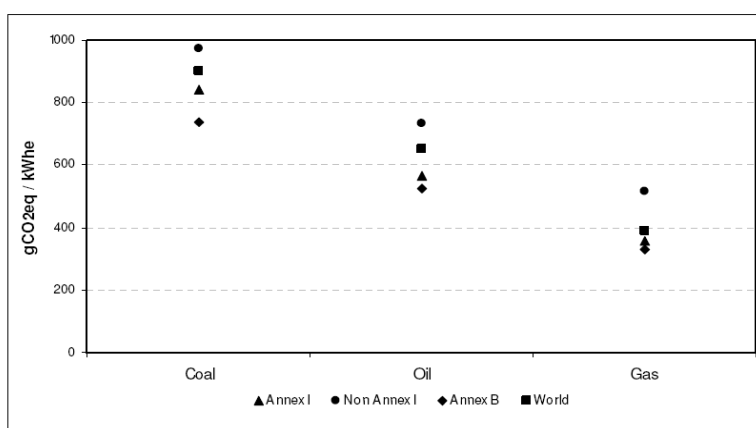
در این فرمول، E_c ، E_o و E_d اشاره به انتشار غیر مستقیم گازهای گلخانه ای دارد. همچنین باید توجه داشت، خروجی خالص برق، مقدار برق تأمین شده برای شبکه به جز انرژی مصرفی جهت بهره برداری از نیروگاه است. عوامل اصلی در تعیین انتشار گازهای گلخانه ای از نیروگاه سوخت فسیلی، نوع فناوری (و بنابراین انتخاب سوخت) و راندمان حرارتی آن می باشد. علاوه بر این، راندمان حرارتی با ضریب بار، افزایش می یابد (کاهش راندمان می تواند با رسیدن به بار کامل بهره برداری مشاهده شود) و بنابراین انتشار گازهای گلخانه ای از فناوری مشخصی از سوخت فسیلی، به روش بهره برداری بستگی دارد (مانند مدیریت اوج بار، تأمین بار مبنای، تأمین برق و حرارت همزمان و غیره). علاوه بر راندمان حرارتی و فناوری نیروگاه، مقدار کربن سوخت نقش مهمی در برآورد انتشار گازهای گلخانه ای مستقیم ایفا می کند. شکل (۱) ارتباط بین ارزش گرمایی پایین (یعنی ارزش گرمایی خالص MJ/kg) و مقدار کربن به ازای واحد انرژی را نشان می دهد. هر سه سری نشان می دهد که بین افزایش مقدار کربن با کاهش ارزش گرمایی خالص ارتباط وجود دارد [۱۱].



شکل ۱: ارتباط بین ارزش گرمایی سوخت و مقدار کربن [۱۱]

انتشار مستقیم گازهای گلخانه ای از نیروگاه های با سوخت فسیلی بستگی به راندمان حرارتی، روش بهره برداری، نوع فناوری و مقدار کربن سوخت دارد. از آنجائیکه فناوری های با راندمان بالاتر نسبت به نیروگاه های با راندمان پایین تر هستند، و سوخت با ارزش حرارتی بالا، گران تر از سوخت های با ارزش حرارتی پایین می باشد، جای تعجب نیست که در کشورهایی که

دارای میزان تولید ناخالص ملی (GDP)^{۱۵} بالاتری هستند، انتشار گازهای گلخانه ای مستقیم به نسبت کشورهایی با دارایی اقتصادی کمتر، پایین تر باشد. شکل (۲) این ادعا را بیان می کند که میانگین انتشار مستقیم از کشورهای ضمیمه A کنوانسیون تغییر آب و هوا (UNFCCC)^{۱۶} و کشورهای عضو ضمیمه B پروتکل کیوتو برای نیروگاه های با سوخت نفت، گاز و زغال سنگ کمتر از میانگین انتشار مستقیم همین نیروگاه ها از کشورهای غیر ضمیمه A کنوانسیون می باشد [۱۱].



شکل ۲: انتشار مستقیم گازهای گلخانه ای [۱۱]

علاوه بر عوامل ذکر شده مؤثر در میزان انتشار گازهای گلخانه ای نیروگاه های مختلف، مراحل پایین دست و بالادست فناوری و چرخه سوخت نیز در این امر اثرگذار است.

همانطور که ذکر شد، LCA اثرات زیست محیطی را در کل چرخه حیات یک محصول یا فرآیند مشخص می کند. LCA گازهای گلخانه ای می تواند اطلاعاتی را برای انتشار هر مرحله چرخه حیات فراهم کند و بنابراین به سیاستگذاران و ذینفعان کمک می کند تا تلاش خود را برای انتشار گازهای گلخانه ای در مراحل حساس چرخه حیات متمرکز کنند. در مقام مقایسه دو یا چند گزینه، LCA می تواند به تصمیم گیران برای مقایسه انتشار تجمعی ناشی از انتخاب فناوری ها به ازای واحد تولید برق کمک کند. علاوه بر این، LCA می تواند برای آگاهی رسانی به مشتریان، آموزش، بازاریابی، برجسب گذاری زیست محیطی و غیره مورد استفاده قرار بگیرد [۱۰].

در زمان استفاده از نتایج LCA گازهای گلخانه ای از فناوری های انرژی، باید به خاطر داشت که سایر اثرات بیوفیزیکی و اثرات توأم با تولید برق مانند اجرای بهره برداری، هزینه یا پذیرش سیاسی و اجتماعی مورد توجه قرار نگرفته اند که البته توجه به چنین اثراتی برای یک ارزیابی جامع ضروری است. طبقه بندی اثرات چرخه حیات در یک مطالعه جامع LCA معمولاً اثرات زیر را در برمی گیرد [۱۰]:

تخریب ازن استراتوسفری، باران و رسوب اسیدی، یوتروفیکاسیون، مه دود فتوشیمیایی، سمیت در محیط خشکی و آبی، سلامت و بهداشت انسان، کاهش منابع و کاربری زمین.

¹⁵ Gross Domestic Product

¹⁶ United Nations Framework Convention on Climate Change

در محاسبه LCA گازهای گلخانه ای تولید برق میزان انتشار گازهای گلخانه ای از مراحل زیر در نظر گرفته می شود. در ضمن انتشار کل گازهای گلخانه ای بر حسب گرم معادل دی اکسید کربن به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی بیان می شود [۱۰].

- اکتشاف، استخراج و فرآوری منابع انرژی
 - استخراج مواد خام برای فناوری و زیرساختها
 - تولید زیرساختها و سوخت
 - تولید و ساخت فناوری
 - حمل و نقل سوخت
 - سایر فعالیت های حمل و نقل (به عنوان مثال در طول مرحله ساخت)
 - تبدیل به برق یا گرما یا انرژی مکانیکی
- مدیریت زائدات و زیرساختهای مدیریت زائدات (مانند زائدات رادیواکتیو، دفع خاکستر و غیره)

روش های ارزیابی چرخه حیات گازهای گلخانه ای

روش های LCA معمولاً شامل تجزیه و تحلیل زنجیره فرآیند (PCA) ^{۱۷} و تجزیه و تحلیل داده / ستانده (I/O) ^{۱۸} می باشد، گرچه ابزارهای ارزیابی ترکیبی (استفاده از عناصر هر دو روش مذکور) نیز غالباً مورد استفاده قرار می گیرد. روش PCA یک روش عمودی پایین به بالا است که انتشار فرآیند های صنعتی و بهره داری را در نظر می گیرد. اگرچه، این روش، خاص انواع ویژه ای از تولیدات است، اما عوامل مؤثر در نتایج تجمعی را واضح تر و تعدیل شده بیان می کند. PCA شدیداً بستگی به داده های گازهای گلخانه ای در دسترس برای همه مواد و فرآیند های مرتبط دارد. وقتی فهرست موجودی کامل مواد در دسترس نیست، PCA می تواند برای ارزیابی مواد استفاده شود و جهت بدست آوردن داده ها برای سیستم بهره برداری و نگهداری می توان از روش داده / ستانده استفاده نمود. از آنجائیکه PCA نمی تواند به طور خاص کل اقتصاد را در نظر بگیرد، بنابراین دارای خطاهای سیستماتیک ناشی از نقص غیر قابل اجتناب در مرزبندی سامانه است که موجب تخمین کمتر از واقعی ورودی های انرژی می باشد. اگرچه چنین خطاهایی ممکن است بسیار کم باشند. در واقع، عدم قطعیت ها در تقریب های مورد استفاده در مدلسازی پیچیده زنجیره های مختلف انرژی احتمالاً بیش از خطای فوق می باشد [۱۱].

روش I/O، بالعکس یک رویکرد آماری بالا به پایین است که کل اقتصاد را به بخش های جداگانه تقسیم می کند. بر اساس ورودی ها و خروجی های اقتصادی، بین بخش ها، I/O جریان انرژی و انتشار همراه آن ها را تولید می کند. بخش های I/O ممکن است خیلی کلی باشند و با هدف LCA منطبق نشود. برخلاف روش PCA، تجزیه و تحلیل I/O پیگیری نقاط اصلی و مهم را مشکل می سازد. با این وجود، یک مزیت روش I/O این است که مانند روش PCA وابستگی موضوعی ندارد. روش I/O می تواند وقتی که شدت واقعی انرژی فرآیند با میانگین بخش متفاوت است، مانع از بروز اشتباهات شود [۱۱].

با توجه به موارد فوق، پیشنهاد می شود از روش های ترکیبی استفاده شود. فواید اصلی رویکردهای ترکیبی عبارتند از: تخمین سریع خروجی های ممکن و برطرف کردن شکاف های داده ای PCA با تخمین های I/O.

¹⁷ Process Chain Analysis

¹⁸ Input /Output

بنابراین مدل های ترکیبی این امکان را می دهد که مرزهای تجزیه و تحلیل از طریق محاسبه برای همه فرایندها وسیع تر شوند. این نکته به خصوص زمانی اهمیت دارد که یک سامانه شامل چندین فرآیند باشد. برای نیروگاه های با سوخت فسیلی، نتایج PCA جزئی و رویکرد ترکیبی خیلی تفاوت ندارد به این علت که مراحل چرخه حیات در هر دو روش به خوبی موازنه می شود. اگرچه، روش های ترکیبی امروزه متداول تر هستند، اما هنوز به عنوان روشی استاندارد مطرح نشده اند. به خصوص که توسعه مستمر پایگاه های داده LCA در ابزارهای تجاری و غیر تجاری LCA (مانند SimaPro, EcoInvent, U.S. Life Cycle Inventory Database)، ممکن است PCA توسعه و رواج بیشتری پیدا کند [۱۱].

انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات انواع نیروگاه ها

در این بخش، نتایج ارزیابی های چرخه حیات و مهمترین مراحل انتشار گازهای گلخانه ای برای فناوری های تولید برق مورد بحث قرار می گیرد.

(۱) نیروگاه های سوخت فسیلی

برای فناوری های سوخت فسیلی، عمده انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات ناشی از بهره برداری نیروگاه است. انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از فعالیت های پایین دستی این فناوری بسیار ناچیز است. اگرچه، انتشار گازهای گلخانه ای بالادست بین سوخت های زغال سنگ، گاز و نفت می تواند اهمیت داشته باشد، اما به طور عمده به علت روش ها و فرآیند های مختلف استخراج، حمل و نقل سوخت و آماده سازی سوخت متفاوت است [۱۱].

(۲) نیروگاه های زغال سنگی

در نیروگاه های زغال سنگی، بخش اعظم انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات ناشی از بهره برداری نیروگاه است. برای نیروگاه های فعلی در حال بهره برداری انتشار گازهای گلخانه ای بین $800 - 1000 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ می باشد. انتشار گازهای گلخانه ای از مراحل ساخت، انهدام نیروگاه پس از عمر مفید و مدیریت زئدات ناچیز است، اما انتشار در مراحل معدنکاری و حمل و نقل زغال سنگ قابل توجه است. انتظار می رود با فناوری های جدید در نیروگاه های زغال سنگی (بهبود راندمان حرارتی نیروگاه و بازیافت متان)، انتشار گازهای گلخانه ای به $750 - 850 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ کاهش یابد [۱۱،۷].

(۳) نیروگاه های نفتی

عمده انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات در نیروگاه های با سوخت نفت، ناشی از بهره برداری نیروگاه است و حدود $800 - 700 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ برآورد می گردد. انتشار گازهای گلخانه ای از ساخت نیروگاه و انهدام نیروگاه قابل چشم پوشی است، اما انتشار مراحل بالادستی ناشی از اکتشاف و استخراج، پالایش و حمل و نقل سوخت قابل توجه بوده و حدود $110 - 40 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ برآورد می شود. انتشار تجمعی این نیروگاه ها $1200 - 500 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ محاسبه گردیده است [۱۱،۷].

۴) نیروگاه های گاز طبیعی

برای فناوری های کنونی نیروگاه های گاز طبیعی، عمده انتشار ناشی از بهره برداری نیروگاه است. انتشار گازهای گلخانه ای این نیروگاه حدود $575 - 360 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kwh}$ محاسبه شده است. انتشار گازهای گلخانه ای از مراحل ساخت و انهدام نیروگاه بسیار ناچیز است. عمده انتشار گازهای گلخانه ای این فناوری ناشی از فرآوری گاز، چاه های venting، بهره برداری از لوله کشی ها (به طور عمده کمپرسورها) و نشت سامانه های حمل و نقل می باشد. با توجه به متفاوت بودن این عوامل در کشورهای مختلف، بنابراین میزان انتشار گازهای گلخانه ای نیز متغیر خواهد بود. به طور کلی انتشار گازهای گلخانه ای مراحل بالادستی و پایین دستی این نوع نیروگاه $130 - 60 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kwh}$ برای فناوری های فعلی برآورد شده است. انتشار تجمعی گازهای گلخانه ای نیروگاه های گاز طبیعی $780 - 440 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kwh}$ تخمین زده شده است. انتظار می رود نیروگاه های گاز طبیعی پیشرفته در آینده کمتر $400 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kwh}$ انتشار گازهای گلخانه ای داشته باشند. به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه ای این نیروگاه ها باید بر کاهش نشتی گاز، بهبود فرآیند احتراق و بهبود راندمان نیروگاه تمرکز کرد [۱۱،۸].

۵) نیروگاه های هسته ای

تفاوت در انتشار گازهای گلخانه ای برای زنجیره انرژی هسته ای را می توان به فناوری غنی سازی مورد استفاده علاوه بر نوع فناوری انرژی هسته ای (مانند راکتور آب تحت فشار $^{19}(\text{PWR})$ ، راکتور آب جوشان $^{20}(\text{BWR})$) نسبت داد. به عنوان مثال، استفاده از فناوری توزیع گازی 21 نسبت به فناوری سانتریفیوژ انرژی بیشتری نیاز دارد. زنجیره انرژی هسته ای به طور کلی شامل معدنکاوای اورانیوم، آسیاب، تبدیل، غنی سازی، ساخت سوخت، نیروگاه، فرآوری مجدد، آماده سازی سوخت مصرف شده، ذخیره سازی موقت زائدات رادیواکتیو و انبار نهایی زائدات رادیواکتیو می باشد. انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات برای راکتورهای آب سبک $^{22}(\text{LWR})$ شامل PWR و BWR (راکتورهای آب سبک رایج ترین راکتورها می باشند) برآورد گردیده است. برخلاف نیروگاه های سوخت فسیلی، عمده انتشار گازهای گلخانه ای نیروگاه های هسته ای ناشی از مراحل بالادستی سوخت و چرخه فناوری با برآورد $20 - 1/5 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kwh}$ می باشد. تفاوت قابل توجه در این برآورد به علت متفاوت بودن فرآیند غنی سازی و استفاده از چرخه بسته یا چرخه یکبار گذر می باشد. انتشار گازهای گلخانه ای در فعالیت های پایین دستی مانند انهدام نیروگاه و مدیریت زائدات حدود $1/4 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kwh}$ - $0/46$ برآورد گردیده است. انتشار تجمعی گازهای گلخانه ای راکتورهای LWR ، $24 - 2/8 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{kwh}$ محاسبه شده است. به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه ای راهکارهای زیر پیشنهاد می شود:

- کاهش ورودی برق برای فرآیند غنی سازی (مانند جایگزینی فناوری های سانتریفیوژ یا لیزر به جای پخش و توزیع گازی)
- استفاده از برق بر پایه سوخت های بدون کربن یا کم کربن [۹، ۱۱، ۱]

¹⁹ Pressurized Water Reactor

²⁰ Boiling Water Reactor

²¹ Diffusion

²² Light Water Reactor

۶) نیروگاه های فتوولتائیک

در مورد نیروگاه های فتوولتائیک، چهار نوع سامانه مورد ارزیابی قرار گرفته است: تک کریستاله، چند کریستاله، غیر کریستاله و $CIGD^{23}$. مطالعات مختلف، میزان انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات نیروگاه های فتوولتائیک را $73 - 43 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ برآورد کرده اند. برخلاف سامانه های سوخت فسیلی، عمده انتشار گازهای گلخانه ای در چرخه حیات بالادستی رخ می دهد. بهره برداری، پایان عمر و فعالیت های حمل و نقل تأثیر معناداری در انتشار تجمعی گازهای گلخانه ای ندارند. در بین سامانه های متفاوت مورد بررسی از نیروگاه های فتوولتائیک، نیروگاه های تک کریستاله دارای حداقل انتشار حدود $62 - 43 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ می باشند در حالی که سایر سامانه های فتوولتائیک حدود $73 - 50 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ انتشار گازهای گلخانه ای در کل چرخه حیات دارند. اختلاف در نتایج در اثر عوامل مختلفی نظیر مقدار و درجه سیلیکون، راندمان واحد، طول عمر، شرایط تابش، تفاوت ها در نصب، نوع سقف (مسطح و شیب دار و غیره می باشد [۱۱].

۷) نیروگاه های باد

برای توربین های بادی، عمده انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از تولید توربین و ساخت نیروگاه است که حدود $90 - 72$ درصد میزان انتشار تجمعی را شامل می شود. انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از مراحل بهره برداری و نگهداری، انهدام نیروگاه، حمل و نقل مواد و توربین حدود $28 - 10$ درصد میزان انتشار تجمعی گازهای گلخانه ای به خود اختصاص می دهد. انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات نیروگاه های بادی نسبت به مکان استقرار می تواند بسیار متفاوت باشد و برای نیروگاه های ساحلی، حدود $30 - 8 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ و برای توربین های فراساحل، $19 - 9 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ برآورد می گردد [۱۱].

۸) نیروگاه های برق آبی

بخش اصلی انتشار گازهای گلخانه ای نیروگاه های برق آبی مربوط به تولید و ساخت نیروگاه برق آبی (به خصوص ساخت سد) و حدود $9 - 2 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ می باشد. مقدار انتشار گازهای گلخانه ای بستگی به اندازه مخزن، نوع و مقدار پوشش گیاهی مغروق در آب، نوع خاک، عمق آب و اقلیم دارد. به طور کلی، انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات نیروگاه های برق آبی حدود $34 - 1 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ برآورد می گردد [۱۱].

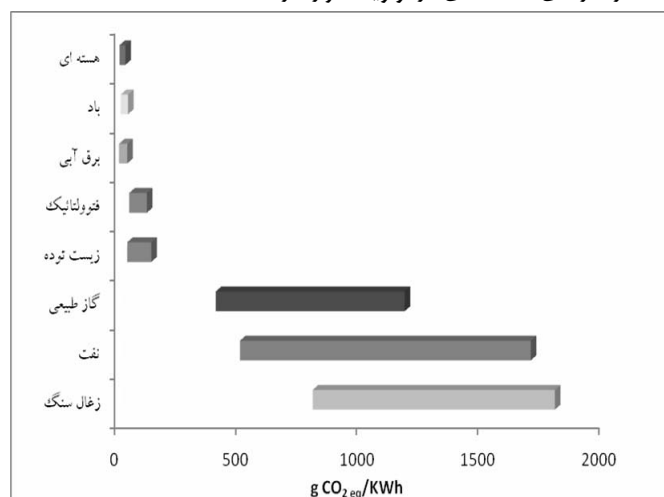
۹) زیست توده

انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات از سامانه های زیست توده بستگی به شدت انرژی چرخه سوخت، مشخصات سوخت زیستی، فناوری مورد استفاده و راندمان تبدیل حرارتی ویژه دارد. انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات نیروگاه های زیست توده حدود $99 - 35 \text{ gCO}_2\text{eq/kwh}$ محاسبه شده است. عمده انتشار ناشی از مرحله چرخه سوخت است و انتشار از سایر مراحل بسیار ناچیز است [۱۱].

²³ Copper Indium Gallium Diselenide

نتیجه‌گیری

در شکل (۳)، میزان انتشار معادل دی اکسید کربن به ازای کیلووات ساعت هر یک از نیروگاه‌های مورد بررسی نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است برای هر نیروگاه، میزان انتشار معادل دی اکسید کربن به صورت بازه‌ای ارائه شده است. حداقل میزان انتشار معادل دی اکسید کربن برابر ۱ گرم دی اکسید کربن به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی مربوط به نیروگاه‌های برق آبی است. پس از نیروگاه‌های برق آبی نیروگاه‌های هسته‌ای و نیروگاه‌های بادی به ترتیب دارای میزان حداقل انتشار معادل دی اکسید کربن هستند. اما در خصوص حداکثر میزان انتشار معادل دی اکسید کربن برای هر نیروگاه، بیشترین میزان انتشار به ترتیب متعلق به نیروگاه‌های زغال سنگی، نفتی و گاز طبیعی، زیست توده، فتوولتائیک، برقابی، بادی و هسته‌ای می‌باشد. به عبارت دیگر با وجود آنکه حداقل میزان انتشار به ترتیب مربوط به نیروگاه‌های برقابی، هسته‌ای و بادی است، اما اگر همین نیروگاه‌ها بر اساس حداکثر میزان انتشار با یکدیگر مقایسه شوند به ترتیب نیروگاه‌های هسته‌ای، بادی و برقابی دارای اولویت خواهند بود. به طور کلی می‌توان اظهار داشت، همانگونه که انتظار می‌رود نیروگاه‌های تجدید پذیر و هسته‌ای نسبت به نیروگاه‌های سوخت فسیلی از دیدگاه انتشار گازهای گلخانه‌ای در اولویت قرار دارند.



شکل ۳: میزان انتشار CO₂eq در نیروگاه‌های مختلف

بر اساس مطالعات انجام شده در خصوص LCA گازهای گلخانه‌ای انواع نیروگاه‌های برق، بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات بر حسب گرم معادل دی اکسید کربن به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی مربوط به نیروگاه‌های حرارتی با سوخت فسیلی به ویژه نیروگاه‌های نفتی و زغال سنگی می‌باشد و کمترین میزان انتشار مربوط به نیروگاه‌های برقابی و هسته‌ای است. پس از نیروگاه‌های برقابی و هسته‌ای نیز کمترین میزان انتشار مربوط به نیروگاه‌های بادی، فتوولتائیک و زیست توده می‌باشد. لازم به ذکر است، انتظار می‌رود با پیشرفت فناوری و استفاده از فناوری‌های جدید، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات در انواع نیروگاه‌ها کاهش یابد.

همانطور که در بخش‌های قبل ذکر گردید، عمده انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات نیروگاه‌های سوخت فسیلی مربوط به بهره‌برداری از نیروگاه است. در مورد نیروگاه‌های هسته‌ای و بیومس، بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای

چرخه حیات ناشی از مرحله فناوری سوخت می باشد. اما در مورد نیروگاه های فتولتائیک، بادی و برق آبی، مرحله ساخت نیروگاه و تولید زیرساختارهای اولیه موجب انتشار بخش عمده گازهای گلخانه ای چرخه حیات این نیروگاه ها می باشد. شایان توجه است که جهت بررسی اثرات زیست محیطی انواع فناوری های تولید برق، تنها توجه به انتشار گازهای گلخانه ای کافی نیست، بلکه باید سایر اثرات زیست محیطی نیروگاه ها مانند اثرات مراحل ساختمانی و بهره برداری نیروگاه بر عوامل محیط فیزیکوشیمیایی، محیط بیولوژیک و محیط اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- [1] Dones, R; Heck, T; Emmenegger, M.F.; Jungbluth, N., 2005, "Life-cycle Inventories for the Nuclear and Natural Gas Energy Systems, and Examples of Uncertainty Analysis". International Journal of Life Cycle Analysis.
- [2] EPA U.S. , 2001, "Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation". LCAccess - LCA 101: Introduction to LCA.
- [3] Guinee, J. B., 2002, "Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards", Leiden University, Netherlands.
- [4] Gurba, L., 2006, "Sustainable Energy Future Contribution of Australian Coal", Melbourne.
- [5] Hondo, H., 2005, Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case, ELSEVIER, Energy Journal.
- [6] IPCC., 2000, "Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories". Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [7] Spadaro, V.; Langlois, L. and Hamilton, B., 2000, "Greenhouse gas emissions of electricity generation chains: Assessing the difference". IAEA Bulletin.
- [8] Tamura, I; Tanaka, T.; Kagajo, T.; Kuwabara, S.; Yoshioka, T.; Nagata, T.; Kurahashi and Ishitani, H., 2001, "Life cycle CO₂ analysis of LNG and city gas. Applied Energy".
- [9] UIC., 2006, "Uranium Enrichment, Nuclear Issues" Briefing Paper 33. Uranium Information Centre Ltd, Australia.
- [10] WEC., 2004, "Comparison of energy systems using life-cycle assessment. A Special Report of the World Energy Council".
- [11] Weisser, D., 2007, A "guide to life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies", PESS/IAEA, Austria.