مقایسه انتشار گازهای گلخانه ای در انواع نیروگاه های 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 سامانه های 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 می دهد. برخی از اثرات عمده زیست محیطی همراه با تولید برق شامل آلودگی هوا (انتشار آلاینده های $CO, NOx, SO_2,$ PM10، آلاینده های سمی نظیر جیوه و غیره)، انتشار گازهای گلخانه ای، استفاده از زمین، اثر بر اکوسیستم (فون و فلور)، اثر بر سلامت انسان می باشد. استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات (LCA)[1] به خوبی می تواند اثرات زیست محیطی در کلیه مراحل چرخه حیات تولید برق را مشخص کند. همچنین با استفاده از LCA می توان روش های مختلف تولید برق را از دیدگاه های زیست محیطی با یکدیگر مقایسه نمود. با توجه به اهمیت موضوع انتشار گازهای گلخانه ای و تغییر اقلیم[2] در این مقاله به مقایسه انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات فناوری های مختلف تولید برق (شامل نیروگاه های با سوخت فسیلی، نیروگاه های هسته ای، نیروگاه های فتوولتائیک، نیروگاه های بادی، نیروگاه های برق آبی و نیروگاه های زیست توده) پرداخته شده است.

کلمات کلیدی:
ارزیابی چرخه حیات (LCA)، تغییر اقلیم، گازهای گلخانه ای، نیروگاه های 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

[1] Life Cycle Assessment
[2] Climate Change

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

مقدمه

با افزایش نگرانی ها در خصوص تغییر اقلیم، درک مناسب از انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از نیروگاه های مختلف تولید برق با دیدگاه محیط زیستی ضروری است. همه سامانه های انرژی انتشار گازهای گلخانه ای را به همراه دارند و به این ترتیب در تغییر اقلیم انسان ساخت شرکت خواهند داشت. امروزه مشخص شده است که انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از استفاده از فناوری انرژی خاصی نیاز به اندازه گیری گازهای گلخانه ای 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 می باشد. 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 نمی شوند[۱۱].

گازهای گلخانه ای و تغییر اقلیم

یکی از نگرانی های عمده زیست محیطی به ویژه در دستیابی به توسعه پایدار، انتشار دی اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه ای می باشد. گازهای گلخانه ای اولیه عبارتند از: دی اکسید کربن (CO_2)، متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O) [۶].

هیأت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) [11] پیشنهادات زیر را در مورد اثرات زیست محیطی تغییر اقلیم مطرح نموده است [۶]:

- دمای بیشتر منجر به چرخه هیدرولوژیکی شدیدی می شود که در واقع موجب خشکسالی های شدید و/ یا سیلاب در مناطق مختلف می شود.
- تغییر اقلیم سریع می تواند توازن بین گونه ها را تغییر دهد و حتی موجب مرگ جنگل ها شود.
- مدل ها نشان می دهند که سطح دریاها تا سال ۲۱۰۰ نسبت به وضعیت کنونی ۵۰ سانتیمتر افزایش خواهد یافت.
- پیش بینی تغییر اقلیم سریع، وسیع و غیر قابل انتظار آینده بسیار مشکل است.

تغییر اقلیم یک مشکل جهانی در ناحیه پیچیده ای از اثر متقابل بین فرآیندهای اقلیمی، زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فناوری است. اثرات تغییر اقلیم در یک افق طولانی مدت آشکار می شود و فعالیت های کنونی بشر، توسعه پایدار را تحت تاثیر قرار خواهد داد. انتشار گازهای گلخانه ای انسان ساخت در بیوسفر عامل اصلی تغییر اقلیم محسوب می شوند.

به خاطر اثرات بالقوه، بسیاری از مطالعات بر ارزیابی انتشار گازهای گلخانه ای سامانه های انرژی تأکید کرده اند. این مطالعات داده هایی در مورد انتشار معادل CO_2 تولید می کنند. به این مفهوم که CO_2 و سایر گازهای گلخانه ای در ارزیابی در نظر گرفته می شوند. اما سایر گازهای گلخانه ای اثرات متفاوتی بر اقلیم دارند و ممکن است عمر جوی متفاوتی نیز داشته باشند. به منظور به حساب آوردن این تفاوت ها، IPCC شاخص های "پتانسیل گرمایش جهانی" (GWP) [۱۲] را ارائه کرده است. در مطالعات LCA هر گاز گلخانه ای به معادل CO_2 تبدیل شده و به فهرست موجودی اضافه می شود. جدول (۱) GWP گازهای گلخانه ای را نشان می دهد [۶].

[11] Intergovernmental Panel on Climate Change
[12] Global Warming Potential

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

جدول ۱: 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_2O	۳۱۰
۴	CF_4	۶۵۰۰
۵	C_2F_6	۹۵۰۰

در بین سامانه های مختلف تولید برق، فناوری‌های مبتنی بر سوخت های فسیلی (زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی) بیشترین میزان انتشار CO_2 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"[۱۳] 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

[13] Product

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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 برقابی 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]:

$$LCE = \frac{\Sigma_i GWP_i \times (Efi + Eci + Eoi + Edi)}{Q}$$

[14] Life Cycle GHG Emission Factor

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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

E_c: انتشار زمان ساخت نیروگاه ها

Eo: انتشار زمان بهره برداری و نگهداری نیروگاه ها

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

i: نوع گاز گلخانه ای

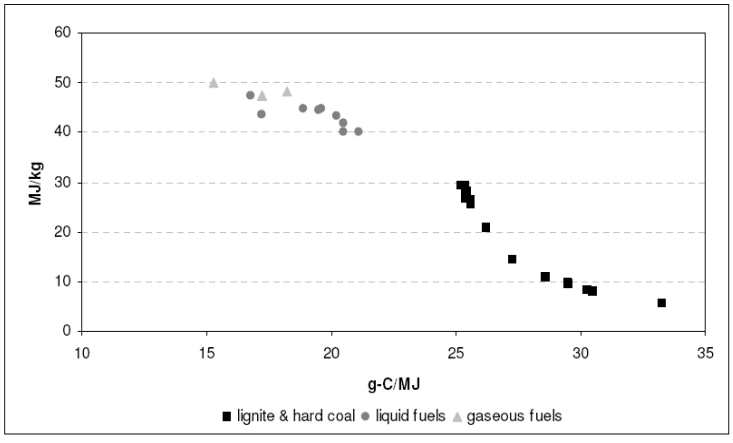
GWP: ضریب پتانسیل گرمایش جهانی هر یک از گازهای گلخانه ای

Q: خروجی خالص بر در طول عمر نیروگاه

در این فرمول، Ec، Eo و Ed 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 مبنا، تامین 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].

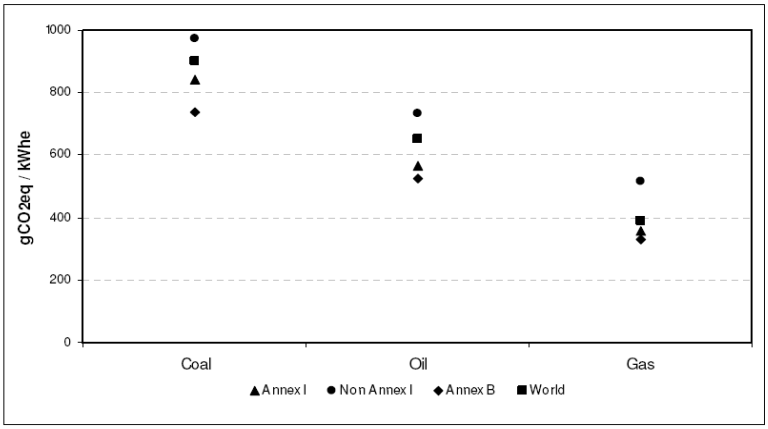


شکل ۱: ارتباط بین ارزش گرمایی سوخت و مقدار کربن [۱۱]

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 گران 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

دارای میزان تولید ناخالص ملی (GDP)[15] 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 I کنوانسیون تغییر آب و هوا (UNFCCC) [16]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 I 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 سیاستگزاران 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، برچسب 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 معمولا 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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 زیرساختارها
- تولید زیرساختارها 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 زیرساختارهای مدیریت زائدات (مانند زائدات رادیواکتیو، دفع خاکستر و غیره)

روش های ارزیابی چرخه حیات گازهای گلخانه ای

روش های LCA معمولا 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 غالبا 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 انوع ویژه ای از تولیدات است، اما عوامل مؤثر در نتایج تجمعی را واضح تر و تعدیل شده بیان می کند. PCA شدیدا 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 احتمالا 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

بنابراین مدل های ترکیبی این امکان را می دهد که مرزهای تجزیه و تحلیل از طریق محاسبه برای همه فرآیندها 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 gCO_{2eq}/kwh ۱۰۰۰ – ۸۰۰ می باشد. انتشار گازهای گلخانه ای از مراحل ساخت، انهدام نیروگاه پس از عمر مفید و مدیریت زئدات ناچیز است، اما انتشار در مراحل معدنکاوی 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 gCO_{2eq}/kwh ۸۵۰ – ۷۵۰ 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 gCO_{2eq}/kwh ۸۰۰ – ۷۰۰ 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 gCO_{2eq}/kwh ۱۱۰ – ۴۰ برآورد می شود. انتشار تجمعی این نیروگاه ها gCO_{2eq}/kwh ۱۲۰۰ – ۵۰۰ محاسبه گردیده است [۱۱،۷].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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 gCO_{2eq}/kwh ۵۷۵ – ۳۶۰ 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 gCO_{2eq}/kwh ۱۳۰ – ۶۰ برای فناوری های فعلی برآورد شده است. انتشار تجمعی گازهای گلخانه ای نیروگاه های گاز طبیعی gCO_{2eq}/kwh ۷۸۰ – ۴۴۰ تخمین زده شده است. انتظار می رود نیروگاه های گاز طبیعی پیشرفته در آینده کمتر gCO_{2eq}/kwh ۴۰۰ 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 (PWR)[19]، راکتور آب جوشان(BWR)[20]) 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 معدنکاوی 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 (LWR)[22] 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 gCO_{2eq}/kwh ۲۰ – ۱/۵ 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 gCO_{2eq}/kwh ۱/۴ – ۰/۴۶ برآورد گردیده است. انتشار تجمعی گازهای گلخانه ای راکتورهای LWR، gCO_{2eq}/kwh ۲۴ – ۲/۸ 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 [۱۱، ۹، ۱]

[19] Pressurized Water Reactor
[20] Boiling Water Reactor
[21] Diffusion
[22] Light Water Reactor

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

۶) یروگاه 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 ۷۳ – ۴۳ gCO_{2eq}/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 ۶۲ – ۴۳ gCO_{2eq}/kwh می باشند در حالی که سایر سامانه های فتوولتائیک حدود ۷۳ – ۵۰ gCO_{2eq}/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 ۹۰ – ۷۲ 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 ۲۸ – ۱۰ 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 ۳۰ – ۸ gCO_{2eq}/kwh و برای توربین های فراساحل، ۱۹ – ۹ gCO_{2eq}/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 ۹ – ۲ gCO_{2eq}/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 نیروگاه‌های برق آبی حدود ۳۴ – ۱ gCO_{2eq}/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 ۹۹ – ۳۵ gCO_{2eq}/kwh محاسبه شده است. عمده انتشار ناشی از مرحله چرخه سوخت است و انتشار از سایر مراحل بسیار ناچیز است [۱۱].

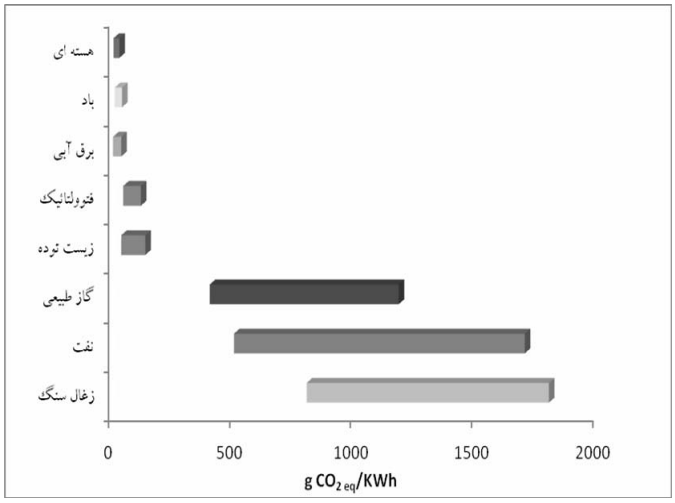
[23] Copper Indium Gallium Diselenide

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

نتیجه‌گیری

در شکل (۳)، میزان انتشار معادل دی اکسید کربن به ازای کیلووات ساعت هر یک از نیروگاه های مورد بررسی نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است برای هر نیروگاه، میزان انتشار معادل دی اکسید کربن به صورت بازه ای ارائه شده است. حداقل میزان انتشار معادل دی اکسید کربن برابر ۱ گرم دی اکسید کربن به ازای هر هر کیلووات ساعت برق تولیدی مربوط به نیروگاه های برق آبی است. پس از نیروگاه های برق آبی نیروگاه های هسته ای و نیروگاه های 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 نیروگاه های زغال سنگی، نفتی و گاز طبیعی، زیست توده، فتوولتائیک، برقابی، بادی و هسته ای می باشد. به عبارت دیگر با وجود آنکه حداقل میزان انتشار به ترتیب مربوط به نیروگاه های برقابی، هسته ای و بادی است، اما اگر همین نیروگاه ها بر اساس حداکثر میزان انتشار با یکدیگر مقایسه شوند به ترتیب نیروگاه های هسته ای، بادی و برقابی دارای اولویت خواهند بود.

به طور کلی می توان اظهار داشت، همانگونه که انتظار می رود نیروگاه های تجدید پذیر و هسته ای نسبت به نیروگاه های سوخت فسیلی از دیدگاه انتشار گازهای گلخانه ای در اولویت قرار دارند.



شکل ۳: میزان انتشار CO2eq در نیروگاه های مختلف

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

همانطور که در بخش های قبل ذکر گردید، عمده انتشار گازهای گلخانه ای چرخه حیات نیروگاه های سوخت فسیلی مربوط به بهره برداری از نیروگاه است. در مورد نیروگاه های هسته ای و بیومس، بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه ای

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]