



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

ارزیابی پیامدهای محیط زیستی نیروگاه حرارتی تولید برق با رویکرد چرخه حیات و ردپای کربن (مطالعه موردی: نیروگاه بخار ایرانشهر)

محدثه نارویی، نرجس اکاتی*، فاطمه عین الهی پیر

گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

اطلاعات مقاله:	چکیده
تاریخ دریافت:	زمینه و هدف: ارزیابی چرخه حیات و بررسی ردپای کربن در نیروگاه‌های حرارتی تولید برق به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی در آن‌ها حائز اهمیت است. این پژوهش با هدف ارزیابی پیامدهای محیط زیستی و ردپای کربن در نیروگاه بخار ایرانشهر انجام گردید.
تاریخ ویرایش:	روش بررسی: پس از جمع‌آوری داده‌های اولیه، تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو (SimaPro) و روش H 2016 ReCiPe و ارزیابی ردپای کربن با مدل‌سازی داده‌ها به روش IPCC (International Panel on Climate Change) انجام گردید. واحد کارکردی در این مطالعه ۱ kWh برق تولیدی و مرز سیستم دروازه تا دروازه بود.
تاریخ پذیرش:	یافته‌ها: بیشترین اثرات محیط‌زیستی در نیروگاه مورد مطالعه در شاخص سطح میانی، پیامد سمیت سرطان‌زای انسانی با ۴۲ درصد و در شاخص سطح پایانی آسیب به سلامت انسانی با ۸۶ درصد بودند. بر اساس انجام آزمون حساسیت، مهم‌ترین عامل مؤثر بر پیامدها گاز طبیعی بود. نتایج IPCC نشان داد که مصرف سوخت‌های فسیلی با ۹۴ درصد بیشترین سهم را در پتانسیل گرمایش جهانی داشت. بیشترین میزان انتشار یافته به ازای ۱ kWh برق تولیدی ۰/۹۴۶ kg به‌دست آمد.
تاریخ انتشار:	نتیجه‌گیری: میزان انتشار شده به ازای هر kWh برق تولیدی از میانگین فاکتور انتشار گاز CO ₂ در نیروگاه‌های سوخت فسیلی کشور (۰/۶۴ kg/kWh) بیشتر بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، بایستی اولویت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک در منطقه مانند انرژی باد و خورشید به‌عنوان انرژی جایگزین در تولید برق مدنظر قرار گیرد.
واژگان کلیدی: ردپای کربن، ارزیابی چرخه حیات، سوخت فسیلی، نیروگاه حرارتی	

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
narjesokati@uoz.ac.ir

Please cite this article as: Narouei M, Okati N, Einollahi Peer F. Evaluating the environmental impacts of the thermal power plant with the approach of life cycle and carbon footprint (case study: Iranshahr steam power plant). Iranian Journal of Health and Environment. 2025;18(1):155-70.



مقدمه

نیروگاه‌های حرارتی به عنوان بزرگ‌ترین تولید کننده انرژی برق در ایران هستند. حدود ۹۳ درصد منابع تولید برق در ایران از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود (۱). از طرفی سوخت‌های فسیلی به عنوان مهم‌ترین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای و عامل اصلی گرمایش جهانی هستند. تقاضای روزافزون برای استفاده از این انرژی سبب افزایش نیروگاه‌های تولید برق با شتاب بیشتری در سال‌های اخیر گردیده است. افزایش تولید برق می‌تواند سبب استفاده بیشتر از سوخت‌های فسیلی و به دنبال آن بالا رفتن غلظت جهانی گازهای گلخانه‌ای همراه شود (۲). بیش از ۶۰ درصد از اثرات محیط زیستی مرتبط با صنعت برق ناشی از بخش تولید آن است (۳). میزان پیامدهای محیط زیستی تولید برق ممکن است در بین کشورها بسته به نوع سناریوی مورد استفاده در تولید آن متفاوت باشد. تغییر در نوع و میزان سوخت‌فسیلی مصرفی نیز می‌تواند باعث انتشار مقادیر متفاوت در میزان کربن تولید شده گردد (۴). سهم انرژی‌های نو، برق آبی و هسته‌ای در تولید برق جهان و به‌ویژه در ایران کم است و نفت، گاز و زغال سنگ مهم‌ترین منابع تولید برق هستند. با این تفاوت که در سطح جهانی، زغال سنگ و در ایران، گاز در تولید برق رتبه اول را به خود اختصاص داده است (۵). در حال حاضر از مجموع کل ۶۲۶ واحد نیروگاه حرارتی کشور، ۱۰۲ واحد از نوع نیروگاه بخار هستند (۶). از آنجا که در تولید برق همیشه اثرات بالقوه بر محیط زیست وجود دارد و از سویی سهم بالای منابع فسیلی مورد استفاده در این صنعت، ضرورت ارزیابی پیامدهای محیط زیستی در نیروگاه‌های حرارتی، به‌عنوان مهم‌ترین منبع تولید برق را مورد تأکید قرار می‌دهد.

روش ارزیابی چرخه حیات یا (Life Cycle Assessment) LCA جامع‌ترین روش ارزیابی اثرات محیط زیستی نیروگاه‌های حرارتی است که بر اساس استانداردهای مختلف از جمله ISO ۱۴۰۴۰ و ISO ۱۴۰۴۱ مورد استفاده قرار گرفته است (۷). مفهوم اساسی LCA شناسایی و تعیین کمیت انرژی و مواد مورد

استفاده برای تولید یک محصول و محصولات جانبی است که دور ریخته و یا در محیط منتشر می‌شوند. این روش از جمله ابزارهایی است که برای بررسی اثرات محیط زیستی استفاده شده است (۸، ۹). بر اساس توافق جهانی و استانداردهای ISO، فرآیند LCA به چهار مرحله مجزا تقسیم می‌شود: (۱) هدف و دامنه، (۲) تجزیه و تحلیل موجودی چرخه عمر، (۳) تجزیه و تحلیل تاثیر چرخه عمر و (۴) تفسیر. گام نخست در زمینه کاستن از پیامدهای منفی محیط زیستی حاصل از انتشار گازهای گلخانه‌ای طی فرآیند تولید برق، برآورد میزان دقیق این گازها که در واژگان علمی از آن به "ردپای کربن (Carbon Footprint)" تعبیر می‌گردد؛ تا بتوان مهم‌ترین فرایندها با بیشترین میزان رهاسازی گازهای گلخانه‌ای را شناسایی نمود و برنامه‌ریزی منسجمی را جهت کاستن از میزان این انتشارها به اجرا گذارد (۱۰). تعیین ردپای کربن به معنی اندازه‌گیری میزان گازهای گلخانه‌ای تولید شده طی فرآیندهای مختلف تولید یک محصول است. در این زمینه روش‌های مختلفی ارائه شده است که در میان آنها روش هیئت بین‌المللی تغییرات اقلیمی (International Panel on Climate Change) از جمله معتبرترین و متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین ردپای کربن حاصل از فعالیت‌های صنعتی است که بر اساس استانداردهای بین‌المللی ISO ۱۴۰۴۰ و ISO ۱۴۰۴۱ توسعه داده شده است. این روش امکان ارزیابی اثرات گازهای گلخانه‌ای را با توجه به عملکرد CO₂ تولید شده در بازه زمانی ۱۰۰ ساله فراهم می‌نماید (۱۱).

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه ارزیابی پیامدهای محیط زیستی و ردپای کربن نیروگاه‌های تولید برق انجام شده است که از آن جمله می‌توان به ارزیابی ردپای کربن در نیروگاه‌های بخار و سیکل ترکیبی و مقایسه آن با نیروگاه زغال سنگ سوز به صورت موردی در استان خراسان جنوبی ایران که توسط Moosavian و همکاران (۱۲) انجام شده است، اشاره نمود. آن‌ها ادعان نمودند که ردپای کربن نیروگاه زغال سنگ سوز

نیروگاه سیکل ترکیبی با ظرفیت 640 MW و سیستم سوخت دوگانه سوز شامل گاز طبیعی و دیزل را در جاوه اندونزی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مهم‌ترین دسته‌های اثر به ترتیب شامل پتانسیل اسیدی شدن، پتانسیل یوتریفیکاسیون و پتانسیل گرمایش جهانی بودند. در همین راستا Malode و همکاران (۷) به بررسی سیستماتیک مطالعات LCA انجام شده بر روی نیروگاه‌های تولید برق با سوخت زغال‌سنگ در هند، استراتژی‌های کاهش انتشار و انتقال و توزیع پرداختند. از آن‌جا که نیروگاه‌های حرارتی تولید برق به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی همواره دارای پیامدهایی منفی بر محیط‌زیست هستند و از طرفی اطلاعات جامعی در این زمینه در مورد نیروگاه بخار ایران‌شهر وجود ندارد، که این خود می‌تواند موضوعی چالش برانگیز باشد، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پیامدهای محیط زیستی به ازای تولید برق در این نیروگاه با استفاده از روش LCA و همچنین تعیین میزان ردپای کربن آن انجام شد که علاوه بر روشن نمودن اثرات محیط‌زیستی آن، راهکارهایی را جهت کاهش اثرات منفی احتمالی ارائه می‌نماید.

مواد و روش‌ها

نیروگاه مورد مطالعه در جنوب شرقی ایران، استان سیستان و بلوچستان و در ۱۸ کیلومتری شمال غربی ایران‌شهر واقع شده است. در جدول ۱ مشخصات عمومی نیروگاه مورد مطالعه آورده شده است.

به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی بالاتر از نیروگاه‌های فسیلی دیگر است. در مطالعه‌های دیگر که توسط Dalir و همکاران (۱۳) انجام شد، مدل جامعی برای محاسبه ردپای کربن در نیروگاه‌های فسیلی کشور ایران ارائه گردید. آن‌ها با لحاظ کردن عوامل مختلف مؤثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین، میزان تولید برق در انواع نیروگاه‌ها، مقدار کربن آزاد شده به ازای تولید هر kWh انرژی را محاسبه کردند و از این منظر به مقایسه نیروگاه‌ها پرداختند. در همین راستا Ozcan (۱۲) مقادیر انتشار سوخت‌های مختلف مورد استفاده در نیروگاه‌های تولید برق در ترکیه را مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه که تنها بر انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از فرایندهای احتراقی متمرکز بود، نشان داد که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوخت‌های فسیلی می‌تواند با جایگزینی منابع قابل تجدید انرژی باد به جای سوخت‌های فسیلی انجام شود. Ferat Toscano و همکاران (۱۴) در پژوهشی به ارزیابی چرخه حیات توربین سیکل ترکیبی با تأکید بر مواد شیمیایی مورد استفاده در فرایند تصفیه فاضلاب با استفاده از روش ReCiPe در نرم‌افزار سیماپرو (SimaPro) پرداختند و ۱۸ دسته پیامد را در سطح میانی بررسی نمودند. از طرفی Annisa و همکاران (۱۵) چرخه نیروگاه‌های تولید برق را ارزیابی نمودند. آن‌ها با کمک روش CML، طبقات اثر پتانسیل اسیدی شدن، پتانسیل تولید ازن فتوشیمیایی و پتانسیل گرمایش جهانی را به ترتیب مهم‌ترین پیامدها ذکر نمودند. از طرفی Sinaga و همکاران (۱۶) چرخه حیات یک

جدول ۱- مشخصات عمومی نیروگاه مورد مطالعه

نوع نیروگاه	مختصات جغرافیایی	اطلاعات میانگین هواشناسی سایت			مساحت (ha)	تعداد واحدها	ظرفیت واحدها (MW)	سال راه اندازی	شرکت سازنده
		دما (°C)	فشار (kPa)	رطوبت (درصد)					
بخار ایران‌شهر	۲۷° ۲۲' ۸۵" N ۶۰° ۴۸' ۹۶" E	۲۷/۴	۱۰۰/۸۲	۲۵	۱۵۰	۴	۲۵۶	۱۳۷۵	اشکودا

محیط‌زیستی را در ۳ سطح تجمعی بالاتر یعنی تأثیرهای تخریبی بر سلامت انسان، اکوسیستم و تخریب به منابع آشکار می‌سازد. در نرم‌افزار سیمپرو اجرای آنالیز حساسیت یک استراتژی مدیریتی است که برای اولویت‌بندی پارامترهای عملیاتی برای کنترل و تصمیم‌گیری استفاده می‌شود (۲۳). در این مطالعه گاز طبیعی به عنوان مهم‌ترین پارامتر شناسایی شد. بنابراین برای ارزیابی اثرات تغییرات بر سایر پارامترها کاهش ۱۰ درصد در مقدار این پارامتر نیز انجام شد.

تحلیل و محاسبه میزان پتانسیل گرمایش جهانی یا GTP (Global Temperature Potential) نیروگاه مورد مطالعه، با استفاده از روش IPCC انجام گردید. جهت محاسبه میزان پتانسیل گرمایش جهانی میزان دی اکسید کربن انتشار یافته طی ۱۰۰ سال در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

لیست سیاهه گردآوری شده در این مطالعه در جدول ۲ آورده شده است. میزان ورودی‌ها شامل آب، سوخت، زمین و برق مصرفی و خروجی‌ها به محیط (انتشارات به هوا و آب) به ازای ۱ kWh برق تولیدی در نیروگاه بخار ایران‌شهر در این جدول ارائه شده است.

نتایج دسته‌بندی اثرات محیط‌زیستی تولید ۱ kWh برق در نیروگاه بخار ایران‌شهر که با استفاده از روش ReCiPi Midpoint H (۲۰۱۶) و آنالیز حساسیت در جدول ۳ آورده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از انجام آزمون حساسیت، با کاهش ۱۰ درصد از مقدار این پارامتر، دامنه کاهش پیامدها در نیروگاه بخار بین ۵/۶۶-۰/۱۱ درصد بود. بیشترین اثر کاهش گاز طبیعی به ترتیب در مورد پیامد از دست رفتن عناصر (۵/۶۶ درصد)، سپس پیامد سمیت سرطان‌زای انسانی (۵/۲۶ درصد) به‌دست آمد (جدول ۳).

مراحل ارزیابی چرخه حیات شامل تعریف هدف و دامنه، تجزیه و تحلیل موجودی چرخه حیات یا LCI (Life Cycle Inventory) و ارزیابی تأثیر چرخه حیات یا LCIA (Life Cycle Impact Assessment) و تفسیر است (۱۷). در مرحله تعریف هدف و دامنه، بر اساس ISO ۱۴۰۴۰ و ISO ۱۴۰۴۱، روند اجرای کار، هدف و دامنه، واحد کارکردی و جریان منبع مشخص می‌شود. مرحله LCI، شامل جمع‌آوری و سازمان‌دهی کلیه داده‌های مرتبط از قبیل میزان مواد ورودی، پسماندهای تولیدی، ترکیبات انتشار یافته و انرژی مصرفی است. سطح دقت و جزئیات داده‌های جمع‌آوری شده در سایر فرآیندهای LCA منعکس می‌شود (۱۸). در مرحله LCIA، ارزیابی اثرات بالقوه محیط‌زیستی و اثرات بالقوه بهداشتی مدنظر است. در نهایت مرحله تفسیر چرخه حیات است که تکنیکی سیستماتیک جهت شناسایی، تعیین کمیت، بررسی و ارزیابی اطلاعات حاصل از نتایج LCI و LCIA، و برقراری ارتباط مؤثر میان آن‌ها است (۱۹). تعیین محدوده مطالعاتی و مرز سیستم با توجه به هدف مطالعه و همچنین تعیین واحد عملیاتی جهت سیاهه‌برداری واحد عملیاتی بیان شد (۲۰). مرز سیستم در این مطالعه نیروگاه بخار ایران‌شهر و واحد عملیاتی ۱ kWh برق تولیدی در این نیروگاه، و مرز سیستم دروازه تا دروازه بود که تنها مرحله تولید برق در نیروگاه را شامل می‌شد. اطلاعات مورد نیاز در این مطالعه از طریق مراجعه به بانک اطلاعاتی نیروگاه و ترازنامه انرژی ایران تهیه گردید.

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار سیمپرو (SimaPro) نسخه ۹/۳، روش ReCiPe و از پایگاه داده اکواینونت (ecoinvent) (نسخه ۳/۴) استفاده شد. روش ReCiPe روشی است که اثرات محیط زیستی مؤثر بر سلامت انسان و مصرف منابع را کمی می‌نماید (۲۱). روش ReCiPe، پیامدها را در سطوح میانی (Midpoint) و پایانی (Endpoint) ارائه می‌کند (۲۲). سطح میانی پیامدهای حاصل از یک محصول یا فرایند را در ۱۸ دسته بررسی می‌نماید. در حالی که سطح پایانی پیامدهای

جدول ۲- لیست سیاهه مربوط به ارزیابی چرخه حیات سیستم نیروگاه بخار ایران شهر (واحد کارکردی: ۱ kWh برق تولیدی)

میزان به ازای ۱ kWh برق تولیدی در سال	واحد	ورودی ها
۰/۱۱	m ³	دمین
۰/۲۵۷		آب مصرفی خام
۰/۲۳	m ³	گاز (خط لوله)
۰/۱۱	L	گازوئیل (تانکر)
۵۰	ha	زمین مصرفی
۰/۱۱	kWh	برق مصرفی
۷۳۲/۷۳۸		CO ₂
۰/۰۱۸		CH ₄
۲/۲۶۱		NO _x
۴/۹۰۵	g/m ³	انتشارات به هوا SO ₂
۰/۱۳۴		SPM
۱۹۹/۸۵۴		C
۰/۱۱	m ³	انتشارات به آب پساب خروجی

جدول ۳- نتایج اثرات محیط زیستی ۱ kWh برق تولیدی در نیروگاه بخار ایران شهر و آنالیز حساسیت

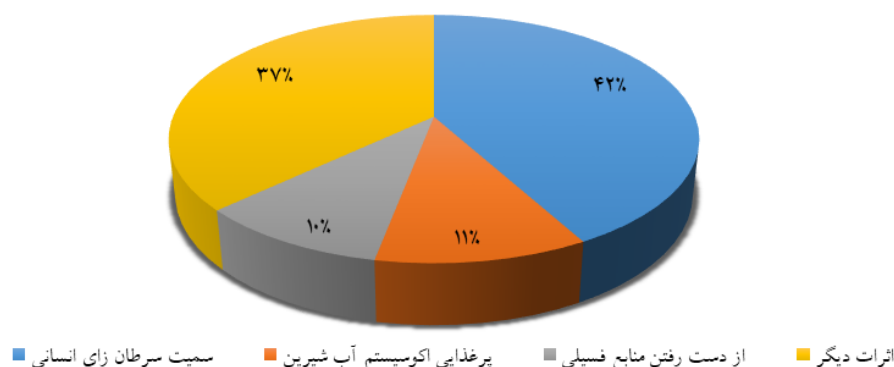
دسته پیامدها	واحد	میزان مشخص شده	میزان نرمال سازی شده	آنالیز حساسیت گاز طبیعی
گرمایش جهانی	kg CO ₂ eq	۱/۰۴۷۷۱۹	۰/۰۰۰۱۳۰۹۶	۱/۰۶٪
سمیت اکوسیستم خشکی	kg 1,4-DCB	۰/۴۶۰۴۶۷	۰/۰۰۰۰۳۰	۱/۵۲٪
سمیت غیرسرطانزای انسانی	kg 1,4-DCB	۰/۴۲۳۶۲۴	۰/۰۰۰۰۱۳۵	۰/۳۸٪
از دست رفتن منابع فسیلی	kg oil eq	۰/۳۷۳۶۰۷	۰/۰۰۰۳۸۱۰۷	۵/۶۶٪
مصرف آب	m ³	۰/۰۱۷۹۱۷	۰/۰۰۰۰۶۷۱	۰/۱۱٪
سمیت سرطانزای انسانی	kg 1,4-DCB	۰/۰۱۶۲۹۷	۰/۰۰۱۵۸۲	۵/۲۶٪
اسیدی شدن خشکی	kg SO ₂ eq	۰/۰۰۹۷۱۸	۰/۰۰۰۲۳۷۱۲	۰/۲۱٪
سمیت اکوسیستم دریایی	kg 1,4-DCB	۰/۰۰۷۱۶۵	۰/۰۰۰۱۶۴۷	۱/۰۴٪

ادامه جدول ۳- نتایج اثرات محیط زیستی ۱ kWh برق تولیدی در نیروگاه بخار ایرانشهر و آنالیز حساسیت

دسته پیامدها	واحد	میزان مشخص شده	میزان نرمال سازی شده	آنالیز حساسیت گاز طبیعی
کاربری زمین	m ² a crop eq	۰/۰۰۵۰۷۹	۰/۰۰۰۰۹۰۳	۳/۳۹٪
سمیت آب‌های شیرین	kg 1,4-DCB	۰/۰۰۵۰۵۸	۰/۰۰۰۲۰۸۲	۱/۸۹٪
تشعشعات یونیزه	kBq Co-60 eq	۰/۰۰۳۶۷۲	۰/۰۰۰۰۷۶۳۷	۱/۵۸٪
تشکیل ازن اکوسیستم خشکی	kg NO _x eq	۰/۰۰۳۱۴۵	۰/۰۰۰۱۷۷۰	۱/۰۴٪
تشکیل ازن سلامت انسان	kg NO _x eq	۰/۰۰۲۹۸۸	۰/۰۰۰۱۴۵۲	۰/۸۱٪
تشکیل ذرات معلق	kg PM _{2.5} eq	۰/۰۰۱۹۵۹	۰/۰۰۰۰۷۶۵۹	۰/۴۰٪
کمبود مواد معدنی	kg Cu eq	۰/۰۰۰۷۳۹	۶/۱×۱۰ ^{-۹}	۵/۲۰٪
پرغذایی اکوسیستم دریایی	kg N eq	۰/۰۰۰۶۱۱	۰/۰۰۰۱۳۲۶۶	۰/۰۱٪
پرغذایی اکوسیستم آب شیرین	kg P eq	۰/۰۰۰۲۷۲	۰/۰۰۰۴۱۸۵۶۳	۰/۲۵٪
تخریب ازن استراتوسفر	kg CFC11 eq	۲/۶۳×۱۰ ^{-۷}	۰/۰۰۰۰۰۴۳	۰/۵۲٪

پیامدهای پرغذایی اکوسیستم آب شیرین (Freshwater ecosystem Eutrophication) با ۱۱ درصد و از دست رفتن منابع فسیلی (Fossil resource scarcity) با ۱۰ درصد به ترتیب در رتبه‌های بعدی دسته‌بندی اثرات محیط زیستی قرار داشتند.

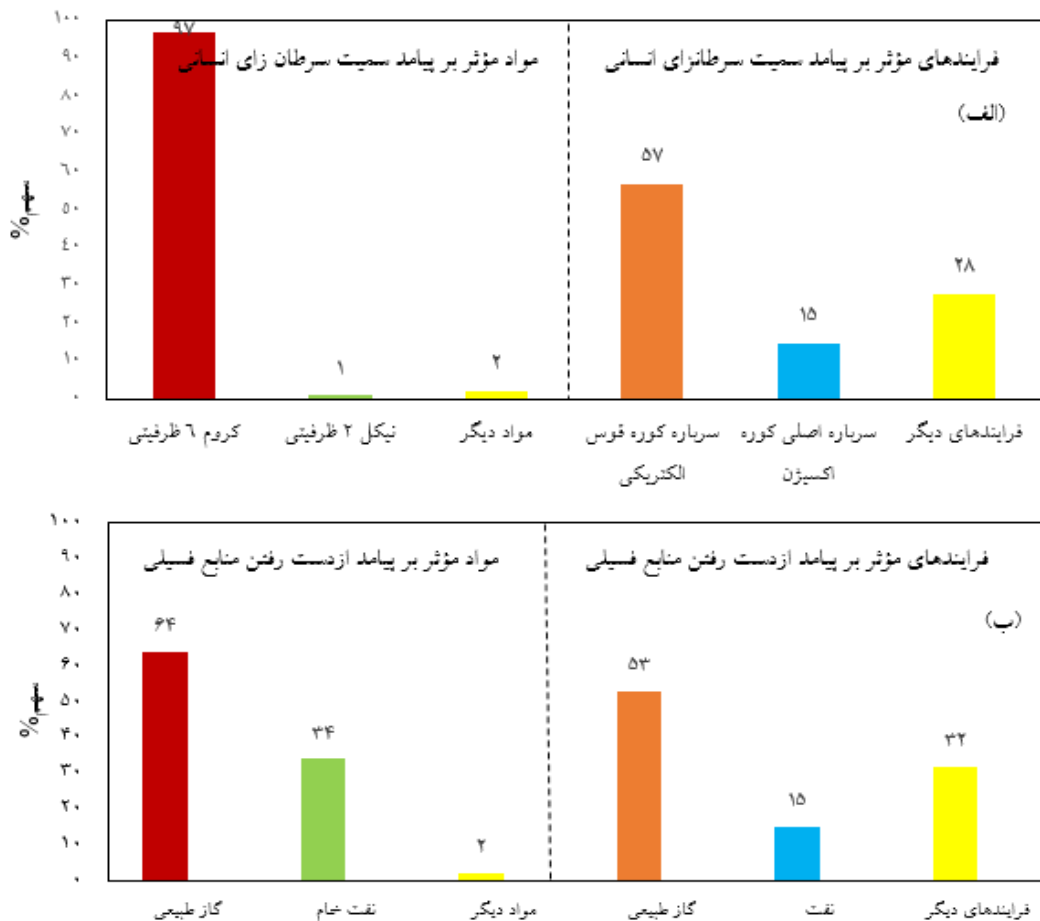
مهم‌ترین پیامدهای سیستم تولید برق در نیروگاه مورد مطالعه بر اساس آزمون نرمال‌سازی شده شاخص سطح میانی، در شکل ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده پیامد سمیت سرطان‌زای انسانی در رتبه نخست دسته‌بندی اثرات محیط زیستی در شاخص سطح میانی در مطالعه حاضر بود. این پیامد در نیروگاه مورد مطالعه ۴۲ درصد اثرات را شامل می‌شد.



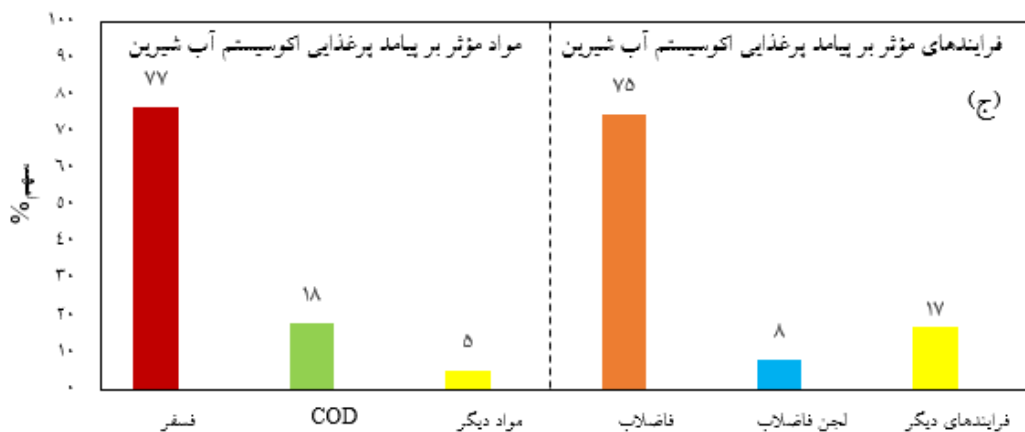
شکل ۱- توزیع مهم‌ترین پیامدهای تولید برق بر اساس روش میانی در نیروگاه بخار

ایجاد اثرات سمیت سرطان‌زا برای انسان در نیروگاه مورد مطالعه بودند. دومین پیامد محیط‌زیستی مهم، پرغذایی اکوسیستم آب شیرین بود. همان‌گونه که شکل ۲-ب نشان می‌دهد مهم‌ترین مواد مؤثر بر پرغذایی اکوسیستم آب شیرین در این مطالعه، فسفر (۷۷ درصد) و COD (۱۸ درصد) و فرآیندهای مؤثر بر آن شامل فاضلاب (۷۵ درصد) و لجن فاضلاب (۸ درصد) بودند. همان‌طور که در شکل ۲-ج نشان داده شده است، گاز طبیعی با ۶۴ درصد و نفت خام با ۳۴ درصد به‌عنوان مهم‌ترین مواد، و فرآیندهای ایجادکننده این دسته اثر نیز گاز طبیعی با ۵۳ درصد و نفت با میزان ۱۵ درصد بودند.

در شکل ۲ نتایج دو آنالیز درونی Per Substance و Per Process جهت تعیین مواد و فرآیندهای مؤثر بر هر یک از دسته اثرات محیط‌زیستی آورده شده است. همان‌گونه که شکل ۲-الف نشان می‌دهد، از مهم‌ترین عوامل دخیل در اثرات سمیت سرطان‌زای انسانی در مطالعه حاضر می‌توان انتشار کروم ۶ ظرفیتی (۹۷ درصد در نیروگاه مورد مطالعه) در آب را برشمرد و پس از آن نیکل ۲ ظرفیتی در هوا با مقدار ناچیز در مقایسه با کروم (۱ درصد) در رتبه بعدی جای داشت. همچنین فرآیندهای سرباره کوره قوس الکتریکی (۵۷ درصد) و سرباره اولیه کوره اکسیژن (۱۵ درصد) از جمله فرآیندهای مؤثر در



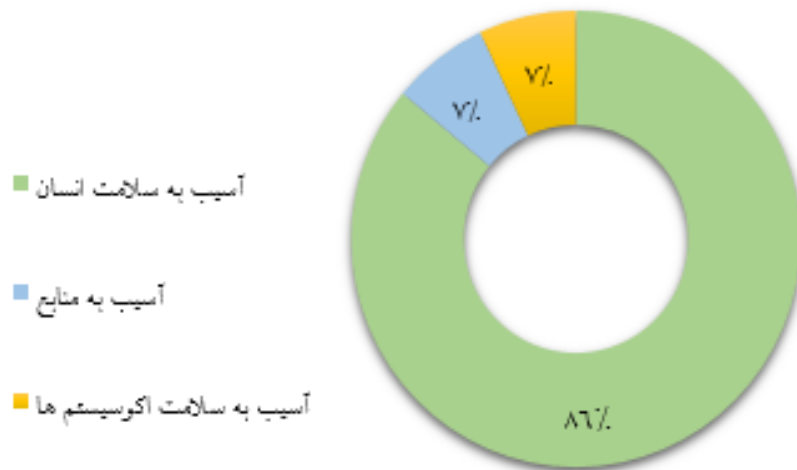
شکل ۲- مواد و فرآیندهای مؤثر بر پیامدهای سمیت سرطان‌زای انسانی (الف)، پرغذایی اکوسیستم آب شیرین (ب) و از دست رفتن منابع فسیلی (ج) در نیروگاه مورد مطالعه



ادامه شکل ۲- مواد و فرآیندهای مؤثر بر پیامدهای سمیت سرطان‌زای انسانی (الف)، پرغذایی اکوسیستم آب شیرین (ب) و از دست رفتن منابع فسیلی (ج) در نیروگاه مورد مطالعه

می‌دهد. به عبارتی تجزیه و تحلیل اثرات در سطح پایانی نشان داد که پیامد سلامت انسانی به‌عنوان بیشترین پیامد در این سطح در مطالعه حاضر بود.

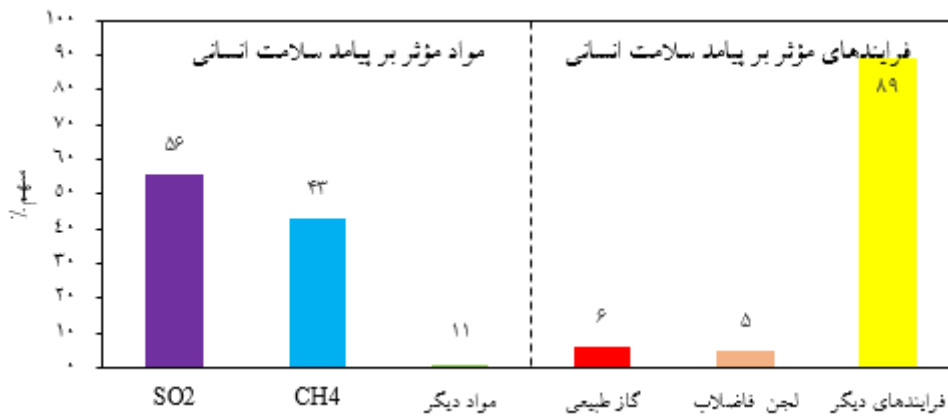
شکل ۳ نتایج روش سطح پایانی اثرات محیط‌زیستی را در ۳ دسته، آسیب به سلامت انسانی (۸۶ درصد)، آسیب به سلامت اکوسیستم (۷ درصد) و آسیب به منابع (۷ درصد) نشان



شکل ۳- درصد توزیع اثرات در شاخص سطح پایانی

مواد در بروز پیامد سلامت انسانی و فرآیندهای مؤثر بر آن نیز شامل گاز طبیعی (۶ درصد) و لجن فاضلاب (۵ درصد) بودند.

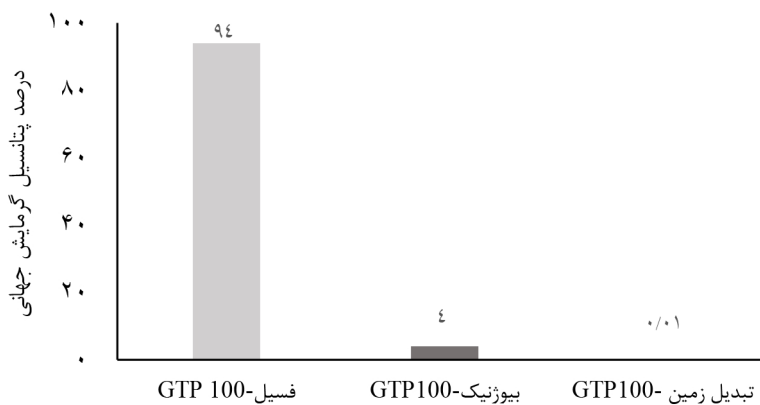
همان‌گونه که شکل ۴ نشان می‌دهد، در نیروگاه بخار مورد مطالعه SO_2 (۵۶ درصد) و متان (۴۳ درصد) به‌عنوان مهم‌ترین



شکل ۴- مواد و فرایندهای مؤثر بر پیامد سلامت انسانی در شاخص سطح پایانی

مطالعه میزان پتانسیل گرمایش جهانی (GTP)، ۹۴ درصد و بیشترین میزان CO_2 انتشار یافته (ردپای کربن) به ازای ۱ kWh برق تولیدی ۰/۹۴۶ kg بود.

نتایج تجزیه و تحلیل IPCC جهت بررسی GWP (بر حسب $kg CO_2 - eq$) برای تعیین پتانسیل گرمایش جهانی در نیروگاه مورد مطالعه در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵- نتایج IPCC در نیروگاه مورد مطالعه

جدید و غیره دارد. در کشورهایی مانند ایران که غنی از منابع سوخت‌های فسیلی هستند، نیروگاه‌های حرارتی حدود ۸۵ درصد برق مورد نیاز کشور را تولید می‌کنند (۲۴). اغلب نیروگاه‌های حرارتی از بخار برای انتقال حرارت و ایجاد انرژی مکانیکی استفاده می‌کنند. نوع بسیار متداول نیروگاه‌های

بحث

امروزه جهت تولید برق از روش‌های مختلفی از جمله انرژی‌های نو و تجدیدشونده، هسته‌ای و سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود. نوع روش تولید برق بستگی به برخی عوامل مانند شرایط اقتصادی، جغرافیایی، اقلیمی، دسترسی به فن‌آوری‌های

که شامل پساب برج خنک کننده، پساب ناشی از واحد تصفیه آب، پساب آلوده به مواد نفتی و سوختی واحدهای تعمیرات، ساختمان توربین، پساب ناشی از شستشوی سطوح خارجی، پیش گرمکن‌ها، سوپرهیترها، پساب ناشی از شستشوی شیمیایی (اسید شویی یا قلیاشویی) لوله‌های بویلر، سوپر هیترها، اکونومایزر، پساب انسانی و پساب شستشوی واحدها است (۲۸) که در صورت تصفیه ناقص می‌توانند وارد اکوسیستم‌های آبی شوند. در مورد پیامد از دست رفتن منابع فسیلی، گاز طبیعی و نفت خام به عنوان مهم‌ترین مواد و فرآیندهای ایجاد کننده این دسته اثر بودند. از آنجایی که بیشترین سوخت‌های مورد استفاده در نیروگاه بخار مورد مطالعه گاز طبیعی و گازوئیل هستند که برای تولید انرژی مورد نیاز چرخش توربین مورد استفاده قرار می‌گیرند، به عنوان عامل مهم در پیامد از دست رفتن سوخت‌های فسیلی محسوب می‌شوند. همچنین دودکش نیروگاه نیز مهم‌ترین محل انتشار دی اکسید کربن و دیگر گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق این سوخت‌ها به هوا است (۲۹). با توجه به متفاوت بودن این عوامل در کشورهای مختلف، بنابراین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه‌ها نیز متغیر خواهد بود. همین‌طور انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای از نیروگاه‌هایی با سوخت فسیلی بستگی به راندمان حرارتی، روش بهره‌برداری، نوع فناوری و مقدار کربن سوخت دارد (۳۰). مهم‌ترین اثر محیط‌زیستی نیروگاه بخار مورد مطالعه در سطح پایانی، آسیب به سلامت انسانی بود. دی اکسید گوگرد و متان به عنوان مواد مؤثر و فرآیندهای مهم نیز شامل گاز طبیعی و لجن فاضلاب بودند. انتشار گاز SO_2 در نیروگاه بخار می‌تواند به خاطر نوع سوخت مصرفی آن باشد که علاوه بر گاز طبیعی از دیزل نیز در فرآیندهای احتراقی آن استفاده می‌شود. همان گونه که برخی مطالعات نشان داده‌اند، نوسان‌ها در نوع سوخت می‌تواند در نوع انتشارات گازی نیروگاه‌های گرمایی مؤثر باشد (۳۱).

در نیروگاه بخار مورد مطالعه، میزان پتانسیل گرمایش جهانی (GTP) ۹۴ درصد و بیشترین میزان CO_2 انتشار یافته

حرارتی، نیروگاه‌های بخار هستند که در آن‌ها، با مشتعل شدن سوخت فسیلی، آب چرخش یافته، به بخار تبدیل می‌شود. از جمله اثرات این نوع نیروگاه‌ها بر محیط‌زیست می‌توان به آلودگی آب، خاک و هوا اشاره نمود. در مطالعه حاضر مهم‌ترین پیامدها در شاخص سطح میانی در نیروگاه بخار ایران شهر به ترتیب سمیت سرطان‌زای انسانی، پرغذایی اکوسیستم آب شیرین و پیامد از دست رفتن سوخت‌های فسیلی بودند. همان‌طور که در نتایج پژوهش Mbohwa (۲۵) نیز به آن اشاره شده است، نیروگاه‌های تولید برق دارای اثرات مخربی بر سلامت محیط و انسان‌ها هستند که هم‌راستا با یافته‌های این مطالعه است. Naserirad و همکاران (۲۶) نیز در ارزیابی اثرات بهداشتی نیروگاه حرارتی، اذعان نمودند که بیشترین اثرات بر سلامت انسان ناشی از آلاینده‌های هوا از جمله مشکلات تنفسی و پس از آن آلاینده‌ها در خاک به سبب ورود پساب تصفیه شده نیروگاه است. از طرفی نتایج Rezaeerad و همکاران (۲۴) در ارزیابی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد نشان داد که این نیروگاه دارای پیامدهای وسیع محیط زیستی است و بالاترین رده اثرات محیط زیستی تولید برق در این نیروگاه مربوط به سمیت آب‌های زیرزمینی و تخلیه منابع فسیلی بوده است؛ در حالی که اسیدی شدن و گرمایش جهانی در رده بعدی اهمیت و از دست رفتن سوخت‌های فسیلی در رده دوم پیامدهای محیط‌زیستی قرار داشت. در مطالعه حاضر، از مهم‌ترین عوامل دخیل در اثرات سمیت انسانی، انتشار کروم ۶ ظرفیتی در آب به همراه فرآیندهای سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره اولیه کوره اکسیژن در ایجاد اثرات سمیت سرطان‌زای انسانی بودند. در حقیقت، فلزات سنگین از جمله کروم ۶ ظرفیتی و نیکل ۲ ظرفیتی حاصل از مصرف و احتراق سوخت‌ها می‌توانند از طریق رسوب گرانشی و جذب شیمیایی به محیط‌های مختلف منتقل شوند و اثرات سمی خود را بروز دهند (۲۷). در نیروگاه مورد مطالعه مهم‌ترین مواد مؤثر بر پرغذایی اکوسیستم آب شیرین، فسفر و COD و فرآیندهای مؤثر بر آن شامل فاضلاب و لجن فاضلاب بودند. در نیروگاه‌های بخار انواع پساب‌ها تولید می‌گردد

این امر ضرورت مطالعات بیشتر برای بررسی میزان مواجهه و ارزیابی ریسک بر سلامت انسان را برجسته می‌نماید که در مطالعه حاضر مجال آن نبود. همچنین میزان انتشار گاز CO₂ به ازای هر kWh برق تولیدی ۰/۹۴۶ kg به‌دست آمد که از میانگین فاکتور انتشار گازهای خروجی از نیروگاه‌های حرارتی کشور بالاتر بود. تولید برق از طریق مصرف سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی همواره پیامدهای منفی بلند مدت برای سلامت انسان و محیط‌زیست پیرامون به دنبال خواهد داشت. از این رو، اولویت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به جای استفاده از سوخت‌های فسیلی و افزایش نیروگاه‌های انرژی‌های نو و تجدیدپذیر به شدت توصیه می‌شود. موقعیت جغرافیایی ایران خصوصاً در مناطق شرق و جنوب شرقی کشور با بهره‌مندی از تعداد روزهای آفتابی فراوان در سال و همچنین پتانسیل خوب انرژی باد، امکان استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی را فراهم نموده است که می‌توانند به‌عنوان مکان‌های مناسب با هزینه‌های اولیه کم و حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای جایگزین نیروگاه‌های حرارتی با سوخت فسیلی شوند.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پایان‌نامه با عنوان "ارزیابی چرخه حیات و ردپای کربن در نیروگاه‌های برق (مطالعه موردی: نیروگاه‌های گازی زاهدان، سیکل ترکیبی و بخار ایران‌شهر)" در مقطع کارشناسی ارشد رشته علوم و مهندسی محیط زیست گرایش ارزیابی و آمایش سرزمین است که در سال ۱۴۰۲ و کد ۱۸۴۶۴۰۲ به تصویب رسیده و با حمایت دانشگاه زابل انجام شده است. نویسندگان از کلیه کسانی که در انجام این پژوهش یاری رساندند، کمال تشکر را دارند.

(ردپای کربن) به ازای هر kWh برق تولیدی ۰/۹۴۶ kg به‌دست آمد که این مقدار از میانگین فاکتور انتشار گازهای خروجی از نیروگاه‌های حرارتی کشور برای گاز CO₂ به میزان ۰/۶۴۰ kg/kWh (۳۲)، بالاتر بود. همچنین در مطالعه Motahari و همکاران (۳۳) میزان ردپای کربن ۰/۵۵۸ kg/kWh برآورد شد که کمتر از مطالعه حاضر است. از طرفی میانگین ردپای کربن در نیروگاه بخار و سیکل ترکیبی استان خراسان جنوبی ۰/۵۷۹ kg/kWh گزارش شده است که آن نیز در مقایسه با مقدار به‌دست آمده در این مطالعه کمتر بود. Moosavian و همکاران (۱۲) میزان دی‌اکسیدکربن انتشار یافته نیروگاه زغال سنگ سوز طبس را ۰/۹۶۸ kg/kWh برآورد نمودند که در مقایسه با نیروگاه بخار مورد مطالعه در این مطالعه بالاتر است. Song و همکاران میانگین مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای کل شبکه برق محلی در Maccao را ۰/۶۹ kg CO₂/kWh گزارش نمودند که نسبت به مقدار به‌دست آمده در مطالعه حاضر کمتر است (۳۴). از آنجا که مرحله تولید برق به عنوان مهم‌ترین مرحله از لحاظ آسیب‌های محیط‌زیستی در طول چرخه حیات نیروگاه‌های برق است (۲۶)، در این مطالعه ارزیابی اثرات محیط زیستی تنها برای همین مرحله در نیروگاه مورد نظر انجام شد و مراحل استخراج سوخت، ساخت نیروگاه و حمل و نقل را در بر نمی‌گرفت. همین‌طور در مطالعه حاضر محدودیت‌هایی در مورد برخی دسترسی داده‌های مربوط به سیاهه وجود داشت. داده‌های جزئی انتشارات به آب و خاک به دلیل عدم دسترسی در نظر گرفته نشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده در مورد نیروگاه‌های تولید برق با روش LCA، ارزیابی با رفع محدودیت‌های ذکر شده انجام شود.

نتیجه‌گیری

ارزیابی پیامدهای محیط زیستی نیروگاه بخار مورد مطالعه در سطوح میانی و پایانی، اثرات بر سلامت انسان را به‌عنوان مهم‌ترین پیامد در نتیجه فعالیت این واحد صنعتی نشان داد.

References

1. Raeesi R, Ghasemi Varnamkhasti E, Saeidi SN, Kouhbor MA. Green productivity in Iran's thermal power plants: The Malmquist-Luenberger approach. *Environmental Energy and Economic Research*. 2020;4(1):1-13.
2. Saint Akadiri S, Alola AA, Olasehinde Williams G, Etokakpan MU. The role of electricity consumption, globalization and economic growth in carbon dioxide emissions and its implications for environmental sustainability targets. *Science of the Total Environment*. 2020;708:134653.
3. Orfanos N, Mitzelos D, Saganis A, Dedoussis V. Life-cycle environmental performance assessment of electricity generation and transmission systems in Greece. *Renewable Energy*. 2019;139:1447-62.
4. Quek TA, Alvin Ee W, Chen W, Adam Ng T. Environmental impacts of transitioning to renewable electricity for Singapore and the surrounding region: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2019;214:1-11.
5. United States Environmental Protection Agency. Sources of greenhouse gas emissions. Washington D.C: USEPA; 2025 [cited 2025 Feb 23]. Available from: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>.
6. Amini F, Shafizadeh MA, Saber Fatahi L, Tavanpour M, Soleimanpour P, Goudarzirad R, et al. Energy Balance Sheet for 2020. Tehran: Electricity and Energy Planning and Macroeconomics Office; 2021.
7. Malode S, Mohanta JC, Prakash R. A review on life cycle assessment approach on thermal power generation. *Materials Today: Proceedings*. 2022;56:791-98.
8. Naghibzadeh SS, Moeinaddini M, Zafarani M. Developing a decision support system to provide environmentally and economically optimized scenarios for waste management: a case study application. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2024;17(3):459-78 (in Persian).
9. Daryabeigi Zand A, Rabiee Abyaneh M. Environmental assessment of alternative strategies for municipal solid waste management by means of life cycle assessment modelling (a case study: Chalus, Iran). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2021;14(1):19-34 (in Persian).
10. Odeh NA, Cockerill TT. Life cycle analysis of UK coal fired power plants. *Energy Conversion and Management*. 2008;49(2):212-20.
11. Woodward A, Smith KR, Campbell-Lendrum D, Chadee DD, Honda Y, Liu Q, et al. Climate change and health: on the latest IPCC report. *The Lancet*. 2014;383(9924):1185-89.
12. Moosavian SF, Hajinezhad A, Hashemi ZS, Borzuei D. Evaluation of carbon footprint

- in steam and combined cycle power plants and comparison with coal-fired power plants. *Journal of Sustainable Energy*. 2022;1(2):97-110 (in Persian).
13. Dalir F, Motlagh MS, Ashrafi K. A dynamic quasi comprehensive model for determining the carbon footprint of fossil fuel electricity: a case study of Iran. *Journal of Cleaner Production*. 2018;188:362-70.
14. Ferat Toscano C, Martin-del-Campo C, Moeller-Chavez G, Leon De Los Santos G, François J-L, Revollo Fernandez D. Life cycle assessment of a combined-cycle gas turbine with a focus on the chemicals used in water conditioning. *Sustainability*. 2019;11(10):2912.
15. Annisa R, Jiwandono K, Marteda G, Sinisuka NI, Dinata IS, Hasibuan OR, et al. Life cycle assessment of natural gas combined cycle steam power generation systems in Indonesia: case study on Gresik power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IOP Publishing*; 2021. p. 012039.
16. Sinaga PD, Moersidik SS, Hamzah US. Life cycle assessment of a combined cycle power plant in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IOP Publishing*; 2021. p. 012122.
17. Santoyo-Castelazo E, Gujba H, Azapagic A. Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*. 2011;36(3):1488-99.
18. Kazemi A, Bahramifar N, Heydari A, Olsen SI. Life cycle assessment of nanoadsorbents at early stage technological development. *Journal of Cleaner Production*. 2018;174:527-37.
19. Liu H, Li Q, Li G, Ding R. Life cycle assessment of environmental impact of steelmaking process. *Complexity*. 2020;2020(1):8863941.
20. Tabesh M, Feizee Masooleh M, Roghani B, Motevallian SS. Life-cycle assessment (LCA) of wastewater treatment plants: a case study of Tehran, Iran. *International Journal of Civil Engineering*. 2019;17:1155-69.
21. Khoshyomn S, Heidari A, Heidari AR. Life cycle assessment of steel production from iron scrap: a case study at a steel plant. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2019;12(1):63-74 (in Persian).
22. Bulle C, Margni M, Patouillard L, Boulay AM, Bourgault G, De Bruille V, et al. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2019;24:1653-74.
23. Hootmirdoosti S, Okati N, Nowrouzi M, Erfani M. Life cycle analysis of the wastewater treatment system in Zabol Industrial Town: Environmental impacts, energy demand, and greenhouse gas emissions. *Integrated Environmental Assessment and Management*.

- 2024;20(5):1747-58.
24. Rezaeeraad R, Elmi M, Samadi R, Nejadkoorki F. Environmental assessment of Yazd combined cycle power plant using the LCA method. *Environmental Researches*. 2019;10(19):67-77 (in Persian).
25. Mbohwa C. Life cycle assessment of a coal-fired old thermal power plant. *Proceedings of the World Congress on Engineering; London: World Congress on Engineering; 2013. p. 3-5.*
26. Naserirad M, Kargari N, Nikoomaram H. Health impact assessment of thermal power plants using the life cycle assessment approach. *Journal of Health System Research*. 2024;20(2):177-83 (in Persian).
27. Peng C, Shen Y, Wu X, Yuan P, Jiang L, Chen S, et al. Heavy metals, nitrogen, and phosphorus in sediments from the first drinking water reservoir supplied by Yangtze River in Shanghai, China: Spatial distribution characteristics and pollution risk assessment. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020;231:1-15.
28. Shabani Aghta R, Rajabizadeh A, Jafari Mansoorian H, Rajabizadeh B, Ahmadi A. The wastewater management of Zarand thermal power plant: Assessment of the wastewater treatment methods, cost analysis, and suggesting the best method. *Health and Development Journal*. 2017;5(4):297-312 (in Persian).
29. Karmaker AK, Rahman MM, Hossain MA, Ahmed MR. Exploration and corrective measures of greenhouse gas emission from fossil fuel power stations for Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*. 2020;244:118645.
30. Weisser D. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy*. 2007;32(9):1543-59.
31. Issakhov A, Mashenkova A. Numerical study for the assessment of pollutant dispersion from a thermal power plant under the different temperature regimes. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019;16:6089-112.
32. Nazari S, Shahhoseini O, Sohrabi Kashani A, Davari S, Paydar R, Delavar Moghadam Z. Experimental determination and analysis of CO₂, SO₂ and NO_x emission factors in Iran's thermal power plants. *Energy*. 2010;35(7):2992-98.
33. Motahari A, Dana T, Kargari N, Monavari SM, Jaafarzadeh Haghghi Fard N. Life-Cycle Assessment of a combined-cycle power plant for electricity generation. *Journal of Advances in Environmental Health Research*. 2023;11(3):147-55.
34. Song Q, Wang Z, Li J, Duan H, Yu D, Liu G. Comparative life cycle GHG emissions from local electricity generation using heavy oil, natural gas, and MSW incineration in Macau. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews. 2018;81:2450-59.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



Evaluating the environmental impacts of the thermal power plant with the approach of life cycle and carbon footprint (case study: Iranshahr steam power plant)

Mohadeseh Narouei, Narjes Okati*, Fatemeh Einollahi Peer

Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 18 December 2024

Revised: 09 March 2025

Accepted: 15 March 2025

Published: 28 May 2025

Keywords: Carbon footprint, Life cycle assessment, Fossil fuel, Thermal power plant

ABSTRACT

Background and Objective: Assessing the life cycle and evaluating the carbon footprint in thermal power plants is crucial due to their reliance on fossil fuels. This study was conducted to evaluate the environmental impacts and carbon footprint of the Iranshahr steam power plant.

Materials and Methods: Primary data were collected and analyzed using SimaPro software and the ReCiPe 2016 method (Hierarchist perspective). The carbon footprint was assessed through data modeling based on the International Panel on Climate Change (IPCC) method. The functional unit was defined as one kilowatt-hour (kWh) of electricity generated, and the system boundary was set as gate-to-gate.

Results: The study revealed that the most significant environmental impacts of the power plant were related to human carcinogenic toxicity, accounting for 42% at the midpoint level, and damage to human health, contributing 86% at the endpoint level. Sensitivity analysis identified natural gas as the most influential factor affecting the results. According to the IPCC method, fossil fuel consumption contributed 94% to the global warming potential. The highest amount of CO₂ emitted was 0.946 kg per kWh of electricity produced.

Conclusion: The CO₂ emissions per kWh of electricity produced (0.946 kg/kWh) exceeded the average CO₂ emission factor for fossil fuel power plants in Iran (0.64 kg/kWh). Based on these findings, it is recommended to prioritize the use of renewable and clean energy sources, such as wind and solar power, as alternatives for electricity generation in the region.

***Corresponding Author:**

narjesokati@uoz.ac.ir

Please cite this article as: Narouei M, Okati N, Einollahi Peer F. Evaluating the environmental impacts of the thermal power plant with the approach of life cycle and carbon footprint (case study: Iranshahr steam power plant). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2025;18(1):155-70.

