نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص: ۲۷-۴۴

J. Energy Conversion
Volume: 8, Issue: 4, 2021: 27-44

DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4

تحلیل نقاط حساس (HOT SPOT) محیط زیستی سیستم‌های تامین انرژی بارویکرد ارزیابی چرخه عمر (LCA)

علیرضا اسپرهم [۱و*] و الهام ابراهیمی [۲]

*۱- دانشجوی دکتری مهندسی سیستمهای انرژی _انرژی ومحیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲-کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع وسیستمهای مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران،ایران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸

چکیده

سیستم‌های انرژی باوجود نقش کلیدی و تنوع گوناگون خود، اثرات جدی بر سلامتی انسان، زیست‌بوم‌ها و منابع طبیعی دارند؛ بنابراین، در دو دهه اخیر، تمرکز بیش از ۱۰۰۰ مطالعه LCA بر سیستم های انرژی، با هدف تعیین و کاهش این اثرات بوده است. این مقاله به بررسی کاربردهای LCA در سیستم‌های انرژی تولید برق و حرارت،جهت تعیین نقاط حساس محیط زیستی می‌پردازد، و نیز اطلاعات مختصر و مهمی را درباره ۱) روش‌شناسی، شامل تعریف اهداف و دامنه مطالعات، پوشش چرخه عمر سیستم و اثرات محیطی زیست ؛۲) یافته‌های اصلی این مطالعات، مخصوصاً با هدف تعیین هات اسپات های محیط زیستی و الگوهای اثر در منابع مختلف انرژی، ارائه می‌دهد. در این مقاله تلاش براین شده است که، پیشنهادات و دستورالعمل‌هایی در زمینه LCA درباره جنبه‌های اصلی روش‌شناسی به منظورهدایت صحیح مطالعات LCA درباره سیستم‌های انرژی و قابل اطمینان بودن نتایج، بررسی گردد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** Alireza. esparham@ut. ac. ir

کلمات کلیدی: ارزیابی چرخه عمر(LCA)، سیستم‌های تامین انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری‌های انرژی، نیروگاه‌ها،انتشار گازهای گلخانه‌ای (CHG).

۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته، سیستم‌های انرژی توجه سرمایه‌گذاران و قانون‌گذاران سطح کلان را به خود جلب کرده‌است. باوجود خط و مشی‌های مختلف کشورها، انتظار می‌رود تقاضای انرژی در جهان رو به افزایش باشد که این امر موجب افزایش فشار برای تأمین آن است؛ بنابراین انتظار می رود که منبع انرژی اولیه که در سال ۲۰۱۲ معادل EJ ۵۶۰ بود، در سال ۲۰۴۰ حدود ۲۰٪-۳۵٪ افزایش یابد. تخمین زده می‌شود که باوجود کاهش منابع طبیعی سوخت‌های فسیلی، خصوصاً منابع نفتی، این سوخت‌ها پاسخگوی بخشی از این افزایش تقاضا در آینده باشند. درنتیجه، تلاش‌هایی برای یافتن منابع جایگزین برای خدمات کنونی وابسته به محصولات نفتی آغازشده‌اند (مانند حمل‌ونقل الکتریکی به‌جای حمل‌ونقل فسیلی). به‌موازات این اقدامات، احتمال توقف منابع نفت و گاز طبیعی باعث شده که ملت‌ها به دنبال استراتژی‌هایی برای تضمین منابع انرژی ایمن، مانند تأسیس ذخایر اضطراری نفت برای خرابی‌های کوتاه‌مدت و یا برنامه‌های طولانی‌مدت جهت گذار به‌سوی منابع تجدید پذیر،

نحوه استناد به این مقاله: علیرضا اسپرهم و الهام ابراهیمی. تحلیل نقاط حساس (HOT SPOT) محیط زیستی سیستم‌های تامین انرژی بارویکرد ارزیابی چرخه عمر (LCA). مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۰; ۸ (۴): ۲۷-۴۴.
DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

باشند[1] . سرانجام، سیستم‌های انرژی، منبع انسانی اولیه‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG)[1] و نیز باعث تغییرات آب‌وهوایی هستند؛ بنابراین، تولید حرارت و الکتریسیته به‌تنهایی مسئول ۲۵٪ از نشر گازهای گلخانه‌ای جهان در سال ۲۰۱۴ بودند، درحالی‌که تنها ۱۴٪ از حمل‌ونقل جهانی را پوشش می دهند. [2] پیشرفت و کاربرد فناوری‌های انرژی تجدید پذیر، گسترش سیستم‌های کنترل و ذخیره کربن، سوخت‌های جایگزین، استفاده پیوسته از توان هسته‌ای و افزایش بازده انرژی، مکانیسم‌هایی مبتنی بر سیاست‌های انرژی ازجمله اقداماتی در راستای دستیابی به توسعه ای پایدار هستند [3,4].

۲- مروری بر تاریخچه

هدف این بخش ارائه یک تاریخچه کلی از تحقیقات در زمینه LCA سیستم‌های حرارتی و الکتریکی می باشد. نقاط کلیدی مطالعات LCA منتشرشده تحلیل و جنبه روش‌شناسی یافته‌های اصلی ارائه می شود.

۲-۱ هدف و چشم‌انداز

می‌توان مطالعات LCA در سیستم‌های حرارتی و الکتریکی را بر اساس چشم‌انداز، مقیاس، پیچیدگی و اهداف مطالعه به دو بخش اصلی تقسیم کرد:

۱. مطالعاتی برای ارزیابی سیستم،منبع،فناوری انرژی خاص را در مقیاس نیروگاهی (باوجود احتمالی سیستم توزیع و انتقال) یا در مقیاس زیرمجموعه نیروگاهی (مانند بخش خاصی از یک سیستم). اهداف این مطالعه شامل تحلیل نقاط ضعف جهت بومی سازی، گزارش و مستندسازی عملکرد محیط زیستی یک فناوری جدید، محک‌زنی در برابر فناوری‌های دیگر با استفاده از منابع انرژی یکسان یا مختلف (تجدید پذیر یا تجدید ناپذیر).

۲. مطالعاتی برای ارزیابی سیستم‌ها ازنظر مفهومی، درمقیاس متوسط و بزرگ. این مطالعات، سیستم‌های تأمین را به پارامترهای وابسته به مفهوم مانند تقاضای انرژی، انواع کاربردهای سیستم و غیره مرتبط می‌کنند. اهداف ابتدایی این مطالعات با تحلیل تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری در مقیاس شهری، ملی یا منطقه‌ای هم‌جهت هستند. این بخش شامل بازنگری مطالعات انجام شده در زمینه موضوعاتی همچون انرژی، نفوذ انرژی‌های تجدید پذیر در شبکه برق، نصب و اجرای شبکه‌های کوچک در ساختمان‌ها و غیره می باشد.

بیشتر مطالعات انجام‌شده روی سیستم‌های انرژی از نوع مطالعات دسته اول هستند، درحالی‌که مطالعات دسته دوم اغلب پس از سال ۲۰۱۰ انجام‌شده‌اند. در این سال‌ها، مطالعات گروه اول توسط تأمین‌کنندگان برق و محققین علمی برای فناوری‌های شخصی، منابع انرژی و شبکه‌های ملی و محلی انجام‌شده است. اکنون حجم عظیمی از داده‌ها را در پایگاه داده‌های LCI، مانند اکواینونت[2]، یافت [5] که در آن‌ها هزاران فرایند مجزا که ازنظر منبع انرژی، فناوری‌ها و موقعیت‌ها متفاوت هستند و اغلب برحسب تولید ۱kWh یا ۱MJ انرژی تعریف‌شده‌اند، برای افراد حرفه‌ای در زمینه LCA در دسترس هستند. یک نگاه کلی به مطالعات دسته (۱) و مختصری از مطالعات دسته دوم نیز در جدول (۱) آورده شده است.

همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده‌شده است، اغلب از دو نوع اصلی واحد عملیاتی استفاده می‌شود. این مقدار می‌تواند برحسب مصرف یا تقاضای انرژی کل تعریف‌شده برای سناریوهای مختلف در نظر گرفته‌شود [7-6]. در مطالعات گسترده با سناریوهای مختلف و سیستم‌های فرعی ممکن است تعیین مقداری واحد عملیاتی دشوار باشد. این بدان معنی است که برای ارزیابی ملی، حتی باوجود یکسان بودن این واحدها، باید همه واحدهای عملیاتی،تعداد کشورها و سال‌های مطالعه ازنظر عددی تعیین شوند؛ یعنی تأمین وتولید برق با تقاضای سالانه هر کشور سازگار باشد. در مطالعاتی که با محوریت آینده انجام می‌شوند نیز موضوعات مشابهی دیده می‌شود. هر یک از این موارد دارای تقاضای انرژی متفاوتی هستند که برای تحلیل نتایج جهت تعیین مزایای انرژی تجدید پذیر در سیستم‌های تأمین برق در نظر گرفته می‌شوند.

[1] Green house gas
[2] Ecoinvent

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

جدول ۱. مثال‌های مطالعات گروه دوم، مانند مطالعات سیستمی و مفهوم محور

مقیاس	واحد عملیاتی	توصیف مختصر (شامل مدل‌سازی)	مرجع
مقیاس بزرگ (جهانی)، چشم‌انداز آتی	بیان شده به‌عنوان تولید برق برای انطباق با مصرف جهانی تاسال ۲۰۵۰	- ارزیابی اثرات محیط زیستی توسط آژانس بین‌المللی انرژی در بازه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۵۰ - استفاده از مدل ترکیبی LCA همراه با مدل ورود- خروج چند ناحیه‌ای و فرایندهای LCI[1]. شامل یک دیدگاه پویا نسبت به آینده (مانند تکامل شبکه برق طی زمان)	[6]
مقیاس بزرگ (جهانی، منطقه‌ای و ملی) بازنگری گذشته	۱) تولید برق مطابق تقاضای یک کشور در یک سال معین (تقاضای ثابت سالانه برای هر کشور) ۲) یک کیلووات ساعت برق مصرفی در یک کشور معین در یک سال معین	- ارزیابی اثرات محیط زیستی با بازنگری برق تولیدشده کشوری و منطقه‌ای در بازه زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۱ - استفاده از فرایند LCI و آمار تاریخی برق تولیدی از منابع و فناوری‌های مختلف انرژی در هر کشورومنطقه	[8]
مقیاس بزرگ (اتحادیه اروپا) چشم‌انداز آتی	بیان شده به‌عنوان تولید برق مطابق تقاضا در اتحادیه اروپا در بازه زمانی ۲۰۰۵-۲۰۱۰	- ارزیابی اثرات محیط زیستی ناشی از سیاستگذاری استفاده از انرژی زیستی (بیو) در سال های۲۰۰۵-۲۰۱۰و استفاده از LCA نتیجه محور برای دریافت اثرات ناشی از کاربرد این سیاست، مانند افزایش تقاضای زیست‌توده در کشورهای غیراروپایی	[9]
مقیاس بزرگ (اتحادیه اروپا) چشم‌انداز آتی	بیان شده به‌عنوان تولید برق مطابق تقاضای اتحادیه اروپا در سال ۲۰۵۰	- ارزیابی اثرات محیط زیستی ۴۴ مورد تأمین برق اتحادیه اروپا در سال ۲۰۵۰ - استفاده از مدل ترکیبی LCA همراه با مدل ورود-خروج چند منطقه‌ای شامل الزامات تعبیه تغییرپذیری توان باد و خورشید (مانند ذخیره) و تغییر شبکه برای فرایندهای تولید	[7]
مقیاس متوسط (جزیره کوجیگ) چشم‌انداز آتی وحال	تأمین ۲۶۵ کیلووات ساعت برق در روز در جزیره کوجیک به مدت ۲۰ سال (۱۹۳۴. ۵ مگاوات ساعت)	- سه سیستم شبکه کوچک برای کل جزیره کوجیگ (۱. ۲ کیلومترمربع) - بیان شده به‌عنوان مدل اختصاصی با توسعه سیستم برای مواد بازیافت شده	[10]
مقیاس کوچک (خانگی)، حال حاضر	تولید کلی توان در حال حاضر	- مقایسه ۹ سیستم مختلف تولید قدرت برای الزامات انرژی خانه متحرک در ترکیه(به صورت مجزا)	[11]

۲-۲ پوشش چرخه عمر

یکی از قابلیت‌های LCA، تطابق با چشم‌انداز چرخه عمر است. در همه مراحل چرخه عمر، از استخراج مواد اولیه تا مرحله دفع نهایی، اجتناب از قرار دادن بار مسائل محیط زیستی از مرحله چرخه عمر بر دوش مراحل دیگر اهمیت دارد.

منابع تجدید پذیر، اثرات محیط زیستی مهمی فراتر از مرحله استفاده و اجرای خود دارند، مانند تولید؛ بنابراین، با در نظر گرفتن چرخه عمر کامل سیستم‌های انرژی مبتنی بر انرژی‌های تجدید پذیر، می‌توان دید که این سیستم‌ها از سیستم‌های

[1] Life cycle inventory

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

انرژی فسیلی سبزتر هستند اما عاری از اثرات محیط زیستی نیستند. در مطالعات LCA سیستم‌های انرژی، مخصوصاً با نادیده گرفتن مرحله دفع و حتی مرحله کاربرد، چرخه عمر کوتاه شده است. در بازنگری مطالعات LCA درباره انرژی باد می توان دریافت که مرحله تولید تنها مرحله مشترک ارزیابی چرخه عمر همه مطالعات بوده است [12]. طبق گزارش‌ها، مطالعات بیشتری در نیروگاه‌های بادی مراحل اجرا و نگهداری را نیز برخلاف فرضیات، در چرخه عمر در نظر گرفته‌اند. پایان عمر در این مطالعات نادیده گرفته شده یا با فرض کاربرد مجدد و بازیابی مواد یا انرژی مدل‌سازی شده اند. به‌طور مشابه، کادزیسیتریس و همکاران [13] با بازنگری مطالعات LCA سیستم‌های فتوولتاییک لایه‌نازک، همه موارد مرحله تولید را درارزیابی چرخه عمر در نظر گرفتند (شامل استخراج ماده اولی)، درحالی‌که دراکثر مطالعات پیشین همه مراحل در ارزیابی چرخه عمر مانند مراحل استفاده و دفع،مورد توجه قرارنمی گرفت.

اثرات محیط زیستی منابع انرژی تجدید پذیر، از تولید مواد، زیرساخت، تجهیزات مختلف پشتیبان سیستم‌ها مانند ماژول‌های PV[1] و زیرساخت پشتیبان فتوولتاییک یا اجزای توربین‌های باد [12] , آغاز می‌شوند. در صورت بازیافت مواد به‌جای تولید مواد استفاده‌نشده، یا بازیافت انرژی از طریق سوزاندن مواد و جایگزین کردن آن با تولید حرارت، برق به روش‌های سنتی مانند منابع انرژی فسیلی، در پایان عمر سیستم‌ها، می‌توان تاثیرات مثبت قابل‌توجهی در اثرات محیط زیستی سیستم‌ها ایجاد کرد. باوجود ناهماهنگی و کمبود شفافیت در مطالعاتی که شامل مرحله دفع هستند، بیشتر این مطالعات به تأثیر زیاد مرحله دفع بر اثرات محیط زیستی کلی این سیستم‌های انرژی اشاره می‌کنند. علاوه بر آن، برای برخی منابع انرژی، اثرات محیط زیستی درحین استفاده و عملکرد آن‌ها، بیشتر می باشد، مانند تأثیر مصرف آب در مولد برق نیروگاه [15]؛ بنابراین، این مشاهدات خطر مهم قطع چرخه عمر سیستم‌های انرژی و محدود کردن آن،تنها به مراحل تولید ماده اولیه، هشدار می‌دهند. ممکن است تعصبات مهمی در اثر نتایج این مطالعات مفهومی به وجود آیند. مثلاً اگر در یک مطالعه به تأثیر زیاد تولید مواد اشاره شود، درحالی‌که از بازیابی پربازده این مواد در انتهای چرخه عمرشان در مرحله دفع چشم‌پوشی شود، تأثیر محیط زیستی آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی کاهش می یابد.

۳-۲ پوشش اثر

به علت تمرکز شدید سیاست‌های انرژی بر کاهش تغییرات آب‌وهوایی و به حداکثر رساندن بازده انرژی، بیشتر مطالعات LCA متمرکز بر سیستم‌های انرژی، ارزیابی‌های خود را به تعیین مقدار انتشار GHG چرخه عمر (برحسب واحد جرم دی‌اکسید کربن معادل) و تقاضای انرژی (مانند استفاده از شاخص تجمعی تقاضای انرژی، زمان برگشت انرژی) محدود کرده‌اند. تعدادی از بازنگری‌های متمرکز بر فناوری‌ها یا سیستم‌های خاص انرژی، این الگوها را تعریف و گزارش کرده‌اند. مثال‌هایی از این مطالعات عبارت‌اند از: اسکریبر و همکاران [16] با تمرکز بر تولید برق با استفاده از جذب کربن و سیستم‌های ذخیره (CCS)[2]، اروسن و هرویچ [12] با بازنگری مطالعات LCA انرژی بادی و کاتزیسیریس و همکاران [13] با ارزیابی بدنه مطالعات LCA درباره فوتوولتاییک با لایه‌نازک. اگر کسی تمایل به ارزیابی هزینه محیط زیستی یک سیستم یا یک فناوری داشته باشد، وجود تعداد محدودی از عوامل محیطی می‌تواند بر حمایت تصمیم‌گیرنده‌ها تاثیرگذارباشد. ممکن است این موضوع به علت تغییر بارهای محیط زیستی از یک گروه به گروه دیگر باشد، بعبارت دیگر، تصمیم برای کاهش یک عامل،ممکن است منجر به افزایش عامل دیگر شود که در ارزیابی از آن صرف‌نظر شده است.

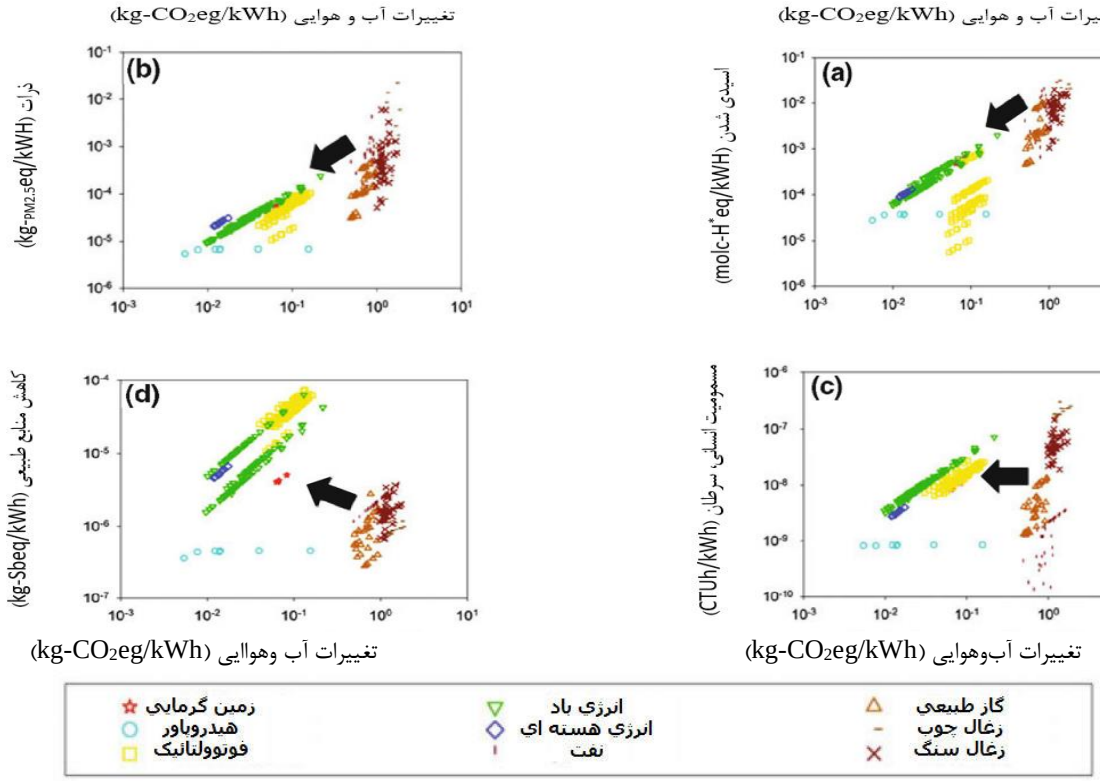
شکل (۱) این پدیده را با در نظر گرفتن تغییر از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدید پذیر برای تولید هر کیلووات ساعت برق، برای تأمین انرژی نشان می‌دهد. [17] مشاهده می‌شود که با حرکت از منابع انرژی فسیلی (نقاط قهوه‌ای شکل ۱) به‌سوی منابع تجدید پذیر (نقاط رنگی)، برای خروجی برق یکسان، اثرات تغییرات آب‌وهوایی[3] حدود ۱تا۲ برابر کاهش می‌یابد

[1] Photovoltaics
[2] Carbon capure and storage
[3] Climate change

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

(محور x). جالب است که سایر عوامل محیط زیستی مانند اسیدی شدن[1] و ذرات[2] (شکل ۱a و ۱b) به‌طور هم‌زمان کاهش یافتند، چون این موارد ریشه در نشر گازهای گلخانه ای دارند. البته ممکن است این رویه برای سایر اثرات محیط زیستی، خصوصاً اثرات وابسته به سمی بودن[3] (شکل۱c) یا کاهش منابع طبیعی غیر تجدید پذیر[4] (شکل۱d)، مشاهده نشود و هم‌زمان با کاهش اثرات تغییر آب‌وهوایی، ممکن است این اثرات ثابت بمانند یا حتی افزایش یابند. برای مثال، این موضوع برای نیروگاه بادی و خورشیدی در شکل های(۱c)و(۱d)(پیشنهاد می شود و میزان مسمومیت انسانی و کاهش منابع طبیعی در مقایسه با تولید برق از گاز طبیعی یا زغال‌سنگ به ترتیب برابر و بیشتر می باشد (به علت انتشار بیشتر فلزات سنگین و استفاده از فلزات نادر در چرخه زندگی سیستم‌های انرژی)[5]. بنابراین در مطالعه‌ای که فقط به ارزیابی تغییرات آب‌وهوا می‌پردازد، احتمال چشم‌پوشی ازاین‌رویه‌ها در اثرات محیط زیستی و هم‌چنین ارائه پیشنهادهایی برای سیاست‌گذاران و تصمیم گیران برای بهینه‌سازی یا ایجاد روش‌های ناپایدار وجود دارد.



شکل ۱: اثرات محیط زیستی منتخب برای تولید برق در مقابل اثرات تغییرات آب‌وهوایی؛ a: اسیدی شدن، b: ذرات، c: مسمومیت انسانی و سرطان، d: کاهش منابع طبیعی. فلش‌های سیاه نشانه رویه تغییر از سوخت‌های فسیلی به منابع انرژی تجدید پذیر. مقیاس لگاریتمی در هر دو محور استفاده‌شده است. مطالعات با استفاده از پایگاه داده LCI اکواوینت و روش ILCD LCIA در نرم‌افزار Sima Pro LCA

۳- یافته‌های اصلی از مطالعات LCA

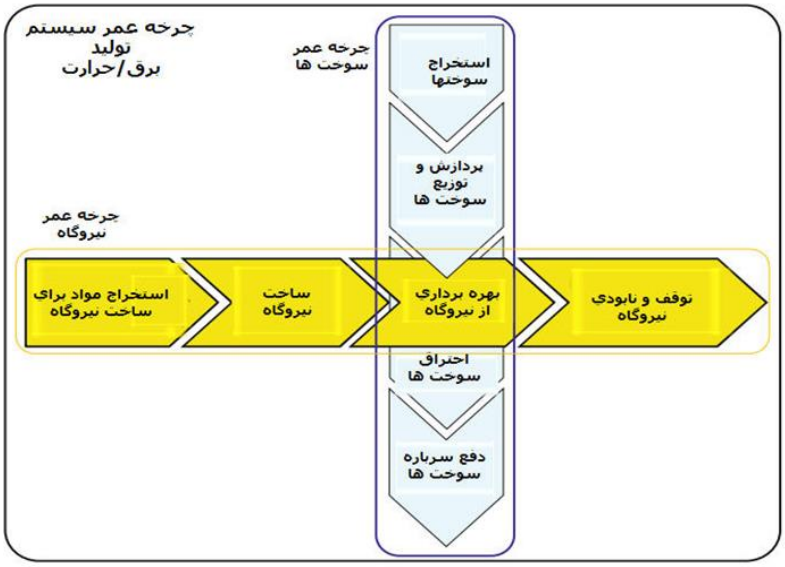
[1] Acidfication
[2] Prticulate Matter
3 Human toxicity
4 Resource depletion

[5] توجه کنید که ممکن است این نتایج نسبت به روش‌های LCIA (Life cycle impact assessment) و داده‌های LCI موجود در پایگاه داده اکواینونت (تفاوت در مرز سیستم‌های فناوری؛ صرفه نظر از سطح فناورانه منابع انرژی تجدیدپذیر) حساس باشند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

۱-۳- تحلیل نقاط حساس(هات اسپات)[1] محیط زیستی

چرخه عمر سیستم‌های تولید حرارت و برق را می‌توان به‌عنوان فصل مشترک دو چرخه عمر دانست: ۱) چرخه عمر نیروگاه، شامل زیرساخت، تجهیزات نیروگاهی، حمل ونقل ؛ ۲) چرخه عمر سوخت‌ها (شکل۲). مورد دوم برای سیستم‌های انرژی باد، انرژی خورشیدی، انرژی برق-آبی و زمین‌گرمایی، با منبع انرژی مستقیم و بدون فرایندهای اضافی موجود در چرخه عمر نیروگاه‌ها، اهمیت چندانی ندارد. این منابع انرژی به هیچ‌گونه احتراقی نیاز ندارند. مطالعات LCA دو نوع الگوی مختلف را برای بومی سازی بزرگ‌ترین اثرات محیط زیستی در چرخه‌های عمر سیستم‌های تولید برق و حرارت، با تمایز عمده بین سیستم‌های فسیلی، زیست‌توده و انرژی هسته‌ای (که در آن‌ها احتراق سوخت انجام می‌شود) و سیستم‌های مبتنی بر انرژی باد، انرژی خورشیدی، انرژی برق-آبی و زمین‌گرمایی (بدون احتراق سوخت) نشان می‌دهند.



شکل۲: چرخه عمر سیستم‌های تولید برق و حرارت به همراه چرخه عمر نیروگاه و سوخت موردنیاز برای راه‌اندازی

بر این اساس، کالاهای سرمایه‌ای[2] (مانند تأسیسات نیروگاهی، توربین‌ها، ماشین‌آلات و غیره) بخشی از این سیستم‌ها هستند که باید آن‌ها را مورد توجه قرارداد. ازآنجاکه کالاهای سرمایه‌ای، محرک اصلی اثرات محیط زیستی ناشی از انرژی برق-آبی، باد، خورشیدی و زمین‌گرمایی هستند (انرژی‌های بدون سوخت) و نباید در این سیستم‌ها آن‌ها را نادیده گرفت، سهم آن‌ها در سایر سیستم‌ها، مانند سیستم‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، کمتر است. فریسکنکت و همکاران وابستگی به نوع اثر محیط زیستی جهت ارزیابی را نشان دادند. در حالت کلی، گروه‌های فاقد مسمومیت، مانند تغییرات آب‌وهوایی، به مقدار ناچیزی تحت تأثیر کالاهای سرمایه‌ای قرار می‌گیرند، درحالی‌که دسته‌های مسمومیت و کاهش, مصرف منابع (مانند کاهش منابع طبیعی فلزی) حساسیت بیشتری به کالاهای سرمایه‌ای دارند. کالاهای سرمایه‌ای در سیستم‌های نیروگاهی زغال‌سنگی، به ترتیب موجب ۹۴٪ و ۸۵٪ کاهش منابع فلزی، معدنی و استفاده از زمین هستند. در نیروگاه‌های گاز طبیعی، سایر اثرات محیط زیستی می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر کالاهای سرمایه‌ای قرار گیرند، بعنوان مثال؛ تأمین گاز طبیعی در ناحیه موردنظر، به انتقال گاز در مسیری طولانی نیاز داشته باشد [18]. با در نظر گرفتن همه اثرات محیط زیستی، این نتایج ایجاب می‌کنند که برای ارزیابی سیستم‌های انرژی، کالاهای سرمایه‌ای مدنظر قرارگرفته شوند.

۱-۱-۳- سیستم‌های مبتنی بر زغال‌سنگ، گاز و نفت

1 Hot spot
2 Capital Goods

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

با توسعه شاخص‌های کاهش منابع طبیعی فلزی و معدنی که نشان‌دهنده پراکندگی اثرات محیط زیستی میان الزامات ساخت نیروگاه و زیرساخت‌های فعالیت‌های معدنکاری هستند، همه اثرات محیط زیستی ابتدا از مرحله راه‌اندازی نیروگاه، خصوصاً از چرخه عمر زغال‌سنگ، گاز و نفت، نشأت می‌گیرند. بنابراین می‌توان سه هات اسپات عمده زیست‌محیطی را به این صورت تعیین کرد:

۱. فعالیت‌های معدنکاری که منجر به اثرات محیط زیستی مسمومیت[1]، اورتوفیکاسیون آب‌های تازه[2] (غنی شدن اکوسیستم های آبی)، استفاده از زمین[3]، کاهش منابع فسیلی[4] از طریق استفاده از منابع و همچنین کاهش منابع فلزی[5] (زیرساخت‌های معدنکاری) می‌شود؛

۲. احتراق سوخت که عامل اصلی همه اثرات محیط زیستی ایجادشده در اثر نشر،مانند تغییرات آب‌وهوایی، اسیدی شدن، اوتریفیکاسیون دریازی وخاکزی ؛ منجر به اثرات محیط زیستی پخش ذرات و مسمومیت می‌شود؛

۳. دفع فلزات سنگین موجود در سرباره احتراق و خاکسترها که منجر به اثرات محیط زیستی مسمومیت می‌شوند.

بر اساس ارزیابی فرایندهای تولید انرژی اکواینونت با استفاده از روش‌های ReCiPe، ILCD وLCIA [5,19]. حساسیت اثرات محیط زیستی مربوط به مسمومیت و اوتریفیکاسیون (غنی شدن اکوسیستم های آبی) به انتشارت طولانی‌مدت در تعیین هات اسپات ها در نظر گرفته‌شده‌اند (افزودن نقاط حساس (هات اسپات های) مرحله چرخه عمر در صورت وجود). چرخه عمر سوخت‌های نیروگاه‌های فسیلی، بیو(زیستی) و هسته‌ای، بخشی از مرحله بهره برداری و راه‌اندازی نیروگاه‌ها در نظر گرفته‌شده است (شکل ۲). بنابراین اولین حرف این کدها نشان‌دهنده موقعیت نقاط حساس (هات اسپات ها)در چرخه عمر نیروگاه‌ها می باشد، حروف داخل پرانتز هم با ارائه موقعیت نقاط حساس (هات اسپات ها) در چرخه عمر سوخت‌ها، هات اسپات هایی را مشخص می‌کند که بیانگر نوع عملیات نیروگاه‌ها هستند. . برای نیروگاه‌ها: RP استخراج مواد اولیه و ساخت نیروگاه‌ها، U مرحله استفاده و راه‌اندازی نیروگاه تولید برق، D انهدام وتخریب نیروگاه. برای سوخت‌ها: RP عملیات معدنکاری یا تولید، تصفیه و پخش منابع (مانند بیوگاز)، U احتراق سوخت، D سر باره یا دفع سوخت مصرف‌شده.

۲-۱-۳- سیستم‌های نیروگاه هسته‌ای

تمامی اثرات محیط زیستی در چرخه عمر سوخت هسته‌ای متمرکزشده‌اند (مانند فعالیت یک نیروگاه). تعداد زیادی از این اثرات مانند تغییرات آب‌وهوایی، سوراخ شدن لایه اوزون، اسیدی شدن، اوتریفیکاسیون منابع آبی، تولید اوزون فوتوشیمیایی، پخش ذرات، کاهش منابع فسیلی و استفاده از زمین، از استخراج و پردازش اورانیوم نشأت می‌گیرند که برای آن منابع انرژی قابل‌توجهی موردنیاز است (مانند ماشین‌آلات دیزلی، برقی و حرارتی). هم‌چنین، استخراج اورانیوم موجب کاهش منابع اورانیوم، خصوصاً در گروه گاهش منابع فلزی، می‌شود. اثرات مسمومیت (ناشی از نشر طولانی‌مدت فلزات سنگین) و اوتریفیکاسیون منابع آب شیرین نیز، به علت از بین بردن کانی‌ها و خرابی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنکاری، بر خواسته از این فرایند هستند. از بین رفتن سوخت هسته‌ای مصرف‌شده، به دلایل یونیزه کردن تشعشع که اولین منبع انتشار می باشد و اثرات مسمومیت و کاهش منابع فلزی که هر دو ناشی از تجهیزات فولادی آماده کردن سوخت هستند(مانند مخازن فولادی و غیره)،دومین اثر محیط زیستی مهم به شمار می آید. سومین هات اسپات بر خواسته از الزامات آبی چشمگیر در حین عملیات نیروگاه هسته‌ای است که باعث اثرات محیطی استفاده از آب می‌شوند.

[1] Ecotoxicity
[2] Freshwater eutrophication
[3] Land use
[4] Fossil deplation
[5] Metal resource deplation

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

جدول ۲. موقعیت نقاط حساس محیط زیستی در سیستم‌های تولید برق و حرارت مربوط به هر گروه از اثرات منبع انرژی

نوع اثر	زغال سنگ	گاز طبیعی	نفت	انرژی هسته ایی	انرژی بادی	انرژی خورشیدی	انرژی هیدرو	زمین گرمایی	زیست توده
تغییرات آب و هوایی	U (U)	U (U)	U (U)	U (RP)	RP	RP	RP	RP	U (RP/U)
تخریب سریع لایه اوزون[1]	U (RP)	U (RP)	U (RP)	U (RP)	RP	RP	RP	U	U (RP)
اسیدی شدن	U (U)	U (U)	U (U)	U (RP)	RP	RP	RP	RP	U (RP/U)
غنی شدن اکوسیستم خاکی[2]	U (U)	U (U)	U (U)	U (RP)	RP	RP	RP	RP	U (RP/U)
غنی شدن اکوسیستم آب های تازه	U (RP)	U (RP)	U (RP)	U (RP)	RP	RP	RP	RP	U (RP/U)
غنی شدن اکوسیستم آب های دریایی[3]	U (U)	U (U)	U (U)	U (RP)	RP	RP	RP	RP	U (RP/U)
تشکیل فوتوشیمیایی لایه اوزون[4]	U (U)	U (U)	U (U)	U (RP)	RP	RP	RP	RP	U (RP/U)
تشعشع یونیزه (سلامتی انسان)[5]	U (RP)	U (RP)	U (RP)	U (D)	RP	RP	RP	RP	U (RP)
ذرات	U (U)	U (U)	U (U)	U (RP)	RP	RP	RP	RP	U (RP/U)
مسمومیت انسانی	U (RP/U/D)	U (RP/U/D)	U (RP/U/D)	U (RP/D)	RP/D	RP/D	RP/D	RP/D	RP/U (RP/U/D) /D
مسمومیت محیطی زیست	U (RP/U/D)	U (RP/U/D)	U (RP/U/D)	U (RP/D)	RP/D	RP/D	RP/D	RP/D	RP/U (RP/U/D) /D
استفاده از آب[6]	U (RP)	U (RP/U)	U (RP/U)	U (U)	RP	RP	RP/U	U	U (RP)
استفاده از زمین	U (RP)	U (RP)	U (RP)	U (RP)	RP/U	RP/U	RP/U	RP/U	U (RP/D)
کاهش منابع فسیلی	U (RP)	U (RP)	U (RP)	U (RP)	RP	RP	RP	RP	U (RP)
کاهش منابع فلزی/ معدنی	RP/U (RP)	RP/U (RP)	RP/U (RP)	U (RP/D)	RP/D	RP/D	RP/D	RP/D	RP/D

[1] Stratosphere ozone depleltion
[2] Terrestrial eutrophication
[3] Marine eutrophication
[4] Photochemical ozone formation
[5] Ionising radiation
[6] Water use

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

۳-۱-۳ سیستم‌های مبتنی بر زیست‌توده

اثرات محیط زیستی سیستم‌های انرژی زیست‌توده عمدتاً متأثر از انواع سوخت‌های استفاده‌شده هستند و ازاین حیث، بیشتر این اثرات بر خواسته از عملیات نیروگاه و خصوصاً چرخه عمر سوخت هستند. اثراتی مانند تغییرات آب‌وهوایی، اسیدی شدن، اوتریفیکاسیون (غنی شدن اکوسیستم های آبی)، تشکیل اوزون فوتوشیمیایی، کاهش منابع فسیلی و پخش ذرات ممکن است از تولید زیست‌توده نشأت بگیرند. اگر منبع انرژی، پسماند زیست‌توده یا مواد باقیمانده‌ای باشد که جای دیگر قابل‌استفاده نیستند، فرایندهای مرتبط با این جریان را نباید در ارزیابی‌ها در نظر گرفت؛ بنابراین فقط فرایندهای احتراق (مانند سوزاندن در کوره، نیروگاه‌های بیوگاز) را به‌عنوان اثرات محیط زیستی این گروه مدنظر قرار داده می شود. به علت تغییرپذیری گسترده سوخت‌ها، ممکن است درارزیابی چرخه عمر نیروگاه‌ها و سوخت‌ها، اثرات مسمومیت در هر مرحله‌ای ایجاد شود؛ مثلاً در صورت استفاده از بیوگاز به‌عنوان سوخت و عدم وجود عناصر سمی، این نقاط حساس (هات اسپات ها) ناشی از چرخه عمر نیروگاه خواهند بود، درحالی‌که در صورت در نظر گرفتن تولید سوخت، هات اسپات ها به تولید سوخت وابسته هستند و موجب مصرف زیاد انرژی یا نشر مستقیم مواد سمی (مانند سموم شیمیایی در کشاورزی) می‌شوند. اثرات محیط زیستی مصرف آب عمدتاً بر تولید بیوگاز متمرکز هستند (در صورت استفاده از بیوگاز و انجام آبیاری). تولید سوخت نیز می‌توانند باعث اثرات محیط زیستی استفاده از زمین شوند و به‌صورت غیرمستقیم اثرات محیط زیستی ایجاد کنند. [20]

۳-۱-۴ سیستم‌های بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی و برق-آبی

تولید این واحدهای نیروگاهی (شامل استخراج مواد اولیه) موجب تمامی اثرات محیط زیستی، به‌جز مصرف آب و استفاده از زمین می‌شود. منشأ دقیق این اثرات برحسب منابع انرژی و فناوری‌های مختلف یک منبع انرژی یکسان، متفاوت است. تولید مواد اولیه و تجهیزات یک واحد نیروگاهی، مانند ماژول‌های PV (مثل قرص‌های سیلیکونی)، توربین‌های باد (مواد فولادی و کامپوزیت‌ها) یا سدها (فولاد مسلح) دلایل اصلی بیشتر این اثرات محیط زیستی، مانند تغییرات آب‌وهوایی، اسیدی شدن، تشکیل اوزون فوتوشیمیایی، اوتریفیکاسیون (غنی شدن اکوسیستم های آبی)، پخش ذرات، یونیزه کردن تشعشع، مصرف آب و کاهش منابع فسیلی هستند. این عوامل عمدتاً بر اساس الزامات انرژی در فرایندهای ساخت توصیف می‌شوند، مانند فرایند ساخت فولاد. کانی‌های گوگردی و خرابی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنکاری، به علت اوتریفیکاسیون (غنی شدن اکوسیستم های آبی)آب شیرین و مسمومیت، در اثر نشر فلزات سنگین و ترکیبات فسفری، سهم قابل‌توجهی در ایجاد اثرات محیط زیستی دارند. دفع فلزات ضایعاتی (مانند فولاد و مس)، خصوصاً برای فناوری‌های تجدید پذیر مانند نیروگاه خورشیدی و بادی، عامل مهمی در مسمومیت انسانی و محیط زیستی می باشد. فرایندهای دفع همراه با فرایندهای استخراج فلزات در آغاز چرخه عمر، موجب کاهش منابع فلزی می‌شوند و چرخه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اثرات محیط زیستی مصرف آب، بسته به منبع انرژی و فناوری مورداستفاده، هات اسپات های مختلفی دارند. الزامات آبی برای تولید تجهیزات نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، نیروگاه‌های برق-آبی و تأمین آب از رودخانه موجب اثرات محیط زیستی می‌شوند. نیروگاه‌های برق- آبی بر اثرات تأمین آب از مخزن و نیروگاه‌های زمین‌گرمایی بر اثرات مصرف آب حین عملکرد تمرکز دارند. می‌توان وابستگی مشابهی را برای استفاده از زمین مشاهده کرد که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های معدنکاری (مانند فوتوولتائیک، تولید برق- آبی تأمین از رودخانه) یا نصب سایت و شبکه توزیع وابسته به آن (مانند مزرعه بادی، نیروگاه برق-آبی تأمین با مخزن، نیروگاه زمین‌گرمایی) هستند.

۳-۲ وابستگی فناوری

همان‌طور که از شکل (۳) مشخص است، نتایج این اثرات محیط زیستی، وابستگی شدیدی به نوع فناوری دارند، حتی درصورتی‌که دارای یک منبع انرژی باشند. دو پارامتر برای اختلاف این فناوری‌ها و نتایج اثرات محیط زیستی آن‌ها اهمیت دارند: وجود فناوری‌های پاک و بازدهی نیروگاه. وجود فناوری‌های پاک، اثرات محیط زیستی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد، مانند: سیستم‌های جذب و ذخیره کربن (CCS) برای کاهش تغییرات آب‌وهوایی در نیروگاه‌های گاز طبیعی و زغال‌سنگ (شکل۳) یا تمیز کردن زغال‌سنگ قبل از احتراق برای کاهش انتشار مواد و اثرات محیطی وابسته به آن [21]. البته

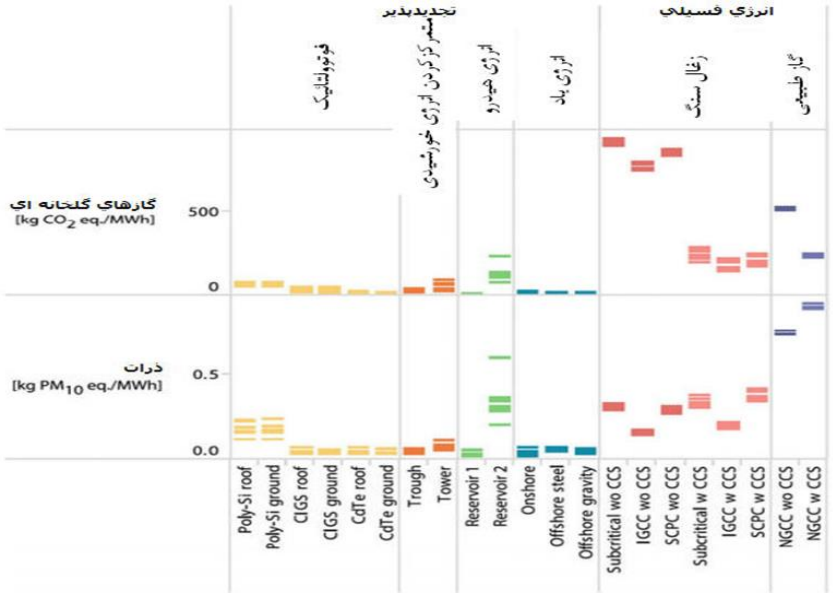
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

شایان‌ذکر است که این فناوری‌ها جهت تمیز کردن تنها یک یا تعداد اندکی از گروه‌های اثرات محیط زیستی را هدف قرار می‌دهند (مانند سیستم‌های CCG جهت کاهش اثرات تغییرات آب‌وهوایی) و ممکن است منجر به تغییر بار اثرات محیط زیستی از یک گروه خاص به‌سوی سایر گروه‌ها شود. برای مثال، تغییر نتایج پخش ذرات بین سیستم‌هایی با و بدون سیستم‌های CSS را برای زغال‌سنگ و گاز طبیعی در شکل (۳) دیده می شود. درحالی‌که با استفاده از سیستم‌های CCS، تغییرات آب‌وهوایی به‌طور قابل‌توجهی کاهش‌یافته‌اند، سایر اثرات محیط زیستی رو به افزایش هستند. این موضوع، نیاز به پوشش کامل همه اثرات را بیشتر می‌کند. بازدهی نیروگاه، یکی دیگر از عوامل مؤثر بر اختلاف موجود در نتایج اثرات محیط زیستی در برابر فناوری می باشد. این بازده به‌صورت نسبت انرژی مفید خروجی (به‌صورت برق یا حرارت) به انرژی ورودی است. بازده نیروگاه برای زغال‌سنگ و گاز طبیعی (سنتی) ۳۰٪-۴۵٪، نیروگاه برق-آبی ۹۰٪، توربین‌های باد ۳۰٪-۵۰٪، سلول‌های خورشیدی ۵٪-۲۰٪ می باشد. این بازده به بیشترین مقدار تعریف‌شده توسط قوانین ترمودینامیک محدود هستند (قانون بازده کارنو). البته می‌توان با استفاده از سیستم‌های بازیابی انرژی، بازدهی را، مخصوصاً برای منابع حرارتی (زغال‌سنگ، گاز و نفت)، بهبود بخشید که بازده تئوری را نیز افزایش می‌دهند. برای مثال، هنگام اجرای سیستم‌های ترکیبی که در آن‌ها اتلاف حرارتی سیکل اول در سیکل‌های بعدی استفاده می‌شود تا انرژی بیشتری بازیابی شود (مانند نیروگاه‌های گازی). تولید هم‌زمان حرارت و قدرت هم می‌تواند این بازده را به‌طور چشمگیری افزایش دهد، مانند استفاده از اتلاف حرارتی نیروگاه‌ها برای حرارت منطقه‌ای. این سیستم‌های ترکیبی می‌توانند به بازده بالای ۹۰٪ منجر شوند.

۲-۲-۳ عملکرد در برابر منابع انرژی

بیشتر مطالعات شامل مقایسه حرارت یا برق تولیدشده توسط منابع انرژی مختلف هستند تا سیستم‌های تحلیل‌شده را ازنظر اثرات محیط زیستی، با سیستم‌های موجود مقایسه کنند. فرایندها برحسب فناوری‌های ارزیابی و فرضیات این ارزیابی‌ها، تفاوت‌های قابل‌توجهی دارند. استفاده بیشتر از نیروگاه‌های هسته‌ای و تجدید پذیر در سیستم‌های انرژی، عموماً موجب کاهش اثرات محیط زیستی گروه‌های مختلفی مانند تغییرات آب‌وهوا و اوتریفیکاسیون (غنی شدن اکوسیستم های آبی)می‌شود [6,8]. گروه‌های دیگر کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند، به‌طور مثال اثرات مسمومیت، مصرف آب و استفاده از زمین در نیروگاه‌های برق-آبی بیشتر از تولید انرژی بر اساس سوخت‌های فسیلی هستند [23].



شکل۳. :گستره نتایج اثر تغییرات آب‌وهوایی و اثر ذرات برای فناوری‌ها و منابع انرژی مختلف [6]. جذب و ذخیره کربن دی‌اکسید CCS، کلسیم تلراید، مس ایندیوم گالیوم سیلناید، چرخه ترکیبی گازی نیروگاه زغال‌سنگی، نیروگاه چرخه گاز طبیعی، نیروگاه بادی با فونداسیون ثقلی، نیروگاه بادی با فونداسیون فولادی، مخازن انرژی آبی به‌عنوان تخمین بالاتر، نیروگاه زغال‌سنگ پودری

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

اغلب گزارش می‌شود که کاهش منابع طبیعی فلزی در سیستم‌هایی حاصل می‌شود که در آن‌ها بازده منابع تجدید پذیر از سوخت‌های فسیلی کمتر است [7,17]. اقتصادهای درحال‌توسعه به انواعی از سیاست‌های انرژی وابسته هستند که مشکلات محیط زیستی را به‌صورت نادرست هدف قرار داده‌اند و درنتیجه منجر به شبکه‌های ترکیبی آلوده‌تر می‌شوند؛ درحالی‌که اقتصادهای توسعه‌یافته با استفاده بیشتر از انرژی‌های تجدید پذیر به‌سوی شبکه‌های ترکیبی پاک‌تر حرکت می‌کنند. [8] در میان منابع تجدید پذیر، انرژی باد اغلب به‌عنوان یک فناوری تجدید پذیر با کمترین اثرات محیط زیستی شناخته می‌شود [24]. طبق گزارش‌ها، انرژی خورشیدی باوجود ایجاد تغییرات بسیار در نتایج اثرات محیط زیستی، به علت اثرات ناشی از تولید مواد و توانایی کمتر برای تولید برق در یک بازه زمانی مشخص، اثرات محیط زیستی بیشتری را نسبت به انرژی باد به ازای تولید یک واحد الکتریسیته ایجاد می‌کند [7]. برای ارزیابی انرژی تجدید پذیر از دو شاخص ارزشمند و مختلف به‌عنوان معیارهای سنجش عملکرد سیستم‌ها استفاده‌شده است: زمان بازگشت انرژی (EPBT)[1] و بازگشت سرمایه‌گذاری روی انرژی (EROI)[2]. EPBT به‌صورت زمانی برای سیستم تعریف می‌شود (عموماً برحسب سال) که باید سپری شود تا انرژی مصرف‌شده برای تولید، نصب، پایان چرخه عمر و تولید انرژی بیشتر از انرژی سرمایه‌گذاری شده در چرخه عمر آن جبران شود. برای مثال، اگر چرخه عمر یک سیستم ۲۰ سال و EPBT آن ۳ سال باشد، به مدت ۱۷ سال انرژی رایگان تأمین می‌کند. EROI به‌صورت نسبت مقدار انرژی قابل‌استفاده ورودی به سیستم به انرژی موردنیاز برای تأمین انرژی لازم جهت تولید، راه‌اندازی و از کار انداختن سیستم که برابر EPBT است، تعریف می‌شود و بدون بعد است. نسبت‌های EROI کمتر از یک در صنعت به‌عنوان فناوری‌های معتبر شناخته نمی‌شوند. EPBT فناوری‌های PV امروزی دارای EPBT برابر ۱الی۴ سال هستند که در صورت استفاده از فناوری‌های کادمیوم تلراید (CdTe) و مس ایندیوم گالیوم مقادیر کمتری برای EPBT و مقادیر ۲/۷ الی۸ و۳۴ برای EROI گزارش می‌شود [25]. اگرچه برای فناوری‌های رایج مزارع بادی EPBT از چند ماه تا ۱الی۲ سال متغیر است و EROI آن در مطالعات اخیر ۸ الی۴۰ بوده است [26]. این ارقام با عملکرد برخی منابع سوخت‌های فسیلی، مانند گاز طبیعی و نفت، قابل‌مقایسه هستند که ERIO آن‌ها به علت قابلیت دسترسی کمتر به منابع آن‌ها، کاهش می‌یابد.

۴- تعریف هدف و دامنه

براساس مطالب ارائه شده،می توان چهار بخش اصلی برای تعریف هدف و دامنه بیان نمود [27] :

۱) تعریف واحد عملیاتی، ۲) تعیین دامنه مرزهای سیستم، ۳) انتخاب طبقه مناسب اثرات محیط زیستی و ۴) چارچوب مدل‌سازی LCI و بررسی فرایندهای چندوظیفه‌ای.

۴-۱ واحد عملیاتی

واحد عملیاتی را باید به‌عنوان خدمت اولیه ارائه‌شده توسط سیستم تعریف کرد، یعنی علت وجود آن. نقش سیستم‌های انرژی که در مطالعات LCA ارزیابی‌شده‌اند، اغلب تأمین برق یا حرارت برای انجام فعالیت‌های دیگر است؛ بنابراین، برای مطالعات دسته‌های محیط زیستی، باید واحد عملیاتی را بر اساس خروجی انرژی تعریف کرد (خواه پاسخگوی یک تقاضای مشخص باشد یا نباشد). مثالی از این نوع اشتباهات، تعریف واحدهای عملیاتی بر اساس سطح خاصی از ماژول‌های PV در مطالعات مقایسه‌ای فناوری‌های PV است. این نوع تعریف باعث صرف‌نظر کردن از بازده‌های مختلف ماژول‌های PV در این مقایسه و درنتیجه، صرف‌نظر کردن از مقادیر مختلف الکتریسیته تولیدی از همان سطح ماژول PV می‌شود. همچنین، تعریف صحیح واحد عملیاتی باعث تضمین قابلیت مقایسه متغیرها و سناریوها در مطالعات LCA انجام‌شده، می‌شود. در مطالعات مبتنی بر تقاضا که بار اصلی را با فناوری انرژی تناوبی مقایسه می‌کنند، مانند سیستم‌های انرژی باد یا PV، این کار می‌تواند به علت مقادیر مختلف قابلیت اطمینان عرضه برای دو سیستم، چالش‌برانگیز باشد. معمولاً با مدل‌سازی منبع دوره‌ای توسط یک سیستم ذخیره یا افزودن یک منبع جبرانی برای مواقعی که منبع تناوبی قادر به تأمین برق نیست، از این کار اجتناب می‌شود.

[1] Energy payback time
[2] Energy return on investment

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

چنین چالش‌هایی برای مقایسه سیستم‌های تأمین الکتریسیته متناسب با تقاضای بار پایه با سیستم‌های متناسب با تقاضای اوج بار نیز به وجود می‌آیند. [21]

هم‌راستا با مطالب ارائه‌شده، دو گروه مطالعات از مطالعات منتشرشده LCA برای سیستم‌های برقی و حرارتی تعریف شده اند:

۱) مطالعاتی که فناوری‌ها،منابع، سیستم‌های خاصی از انرژی را در مقیاس نیروگاهی یا مقیاسی پایین‌تر از آن ارزیابی می‌کنند،

۲) مطالعاتی که مخصوصاً در مقیاس بزرگ و متوسط (مزو[1])، سیستم‌های انرژی را ازنظر چشم‌انداز ارزیابی می‌کنند. دراین مطالعات تعاریف مختلفی برای واحدهای عملیاتی موجود می باشد. در جدول(۳) پیشنهاداتی جهت تعریف واحد عملیاتی برای افراد حرفه‌ای مشغول در زمینه LCA سیستم‌های تأمین انرژی ارائه گردیده است.

جدول ۳. پیشنهاداتی جهت تعریف واحدهای عملیاتی سیستم‌های انرژی (فهرست کلی موقعیت‌ها)

نوع موقعیت/هدف مطالعات	پیشنهادها برای تعریف واحد عملیاتی
مطالعات گروه ۱ (سطح نیروگاهی یا سطح پایین‌تر)	
تمرکز بر مقایسه سوخت ورودی (صرف‌نظر از انرژی خروجی)	تهیه x مگاژول انرژی (مقدار انرژی اولیه) برای نیروگاه z
تمرکز بر تأمین برق یا حرارت	- تولید ۱ کیلووات ساعت یا مگاژول برق، حرارت در نیروگاه یا واحد حرارتی در کشور x (بدون سیستم تبدیل یا توزیع) - تأمین ۱ کیلووات ساعت برق برای شبکه در کشور x (با سیستم تبدیل و توزیع)
- مطالعات گروه ۲ (چشم‌انداز هدف، ارزیابی‌های مقیاس بزرگ و میانی)	
تحقیق درباره نحوه تغییر/توسعه اثرات زیست‌محیطی شبکه	تأمین یا مصرف ۱ کیلووات ساعت الکتریسیته در کشور یا ناحیه x
تحقیق درباره اثرات محیط زیستی کل سیستم تأمین الکتریسیته در طول زمان (با در نظر گرفتن تقاضا)	تأمین برق برای سازگاری با تقاضای کل در کشور یا ناحیه x در سال y (مقدار تقاضای در سناریوهای مختلف ثابت است)

۲-۴ مرزهای سیستم

چرخه عمر سیستم‌های انرژی باید شامل چرخه عمر نیروگاه و سوخت‌های آن باشد که مورد دوم مربوط که منابع انرژی به‌جز باد، خورشید، زمین‌گرمایی و نیروی آب است، زیرا به‌صورت مستقیم هیچ‌گونه سوختی وجود ندارد. برای منابع زمین‌گرمایی و انرژی آب، استفاده از آب (که می‌توان آن را همان سوخت در نظر گرفت) و اثرات مربوط به آن را باید به‌دقت ارزیابی کرد. برای سیستم‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و زیست‌توده در نظر گرفتن چرخه عمر سوخت نیز اهمیت دارد، زیرا منبع اصلی اثرات محیط زیستی هستند (جدول ۲). به‌عنوان یک قانون کلی، برای اجتناب از چشم‌پوشی از اثرات محیط زیستی بزرگ و تغییرات احتمالی هزینه‌ها، پیشنهاد می‌شود که افراد حرفه‌ای چرخه عمر همه سیستم‌های تولید برق و حرارت را در نظر بگیرند. در عمل این کار می‌تواند گاهی اوقات چالش‌برانگیز باشد، مثلاً وقتی چرخه عمر نیروگاه در نظر گرفته می‌شود. بر اساس تحلیل جدول (۲) دستورالعمل زیر را برای تعیین دامنه مرزهای سیستم‌های تولید و برق پیشنهاد می شود:

۱. چرخه عمر سوخت برای همه سوخت‌های فسیلی، سیستم‌های مبتنی بر سوخت‌های هسته‌ای و زیست‌توده.

چرخه عمر نیروگاه‌ها (به‌جز مرحله بهره‌برداری، بنابراین عمدتاً شامل ساخت و تخریب سازه) عموماً سهم کمی در اثرات محیط زیستی مرتبط با تأمین برق و حرارت دارد.

[1] meso

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

۲. چرخه عمر نیروگاه‌ها و تجهیزات انرژی تجدید پذیر.

اغلب اثرات محیط زیستی ناشی از مرحله تولید هستند و مرحله جداسازی نیز سهم عمده‌ای دارد و نباید نادیده گرفته شود.

توجه کنید که این قوانین عمومی و کلی هستند و مخصوص هر فناوری نیستند: افراد حرفه‌ای باید قبل از نادیده گرفتن بخشی از چرخه عمر سیستم، از یک روش قدم‌به‌قدم استفاده کنند. باوجوداینکه ممکن است جدول (۲)که نشان‌دهنده نقاط حساس (هات‌اسپات‌های) محیط زیستی در هر چرخه عمر و برای هر فناوری انرژی می باشد، به‌عنوان یک مرحله غربالگری استفاده شود و افراد حرفه‌ای باید هرگونه استثنای ممکن در این الگوها را در ارتباط با سیستم‌ها تحت مطالعه، خودارزیابی کنند؛ مثلاً، برای سیستم‌های انرژی مبتنی بر زیست‌توده که به پسماند وابسته هستند، ممکن است تخصیص کمی به تولید پسماند داده شود (مثلاً فرض صفر) که احتمالاً چرخه عمر نیروگاه را در حالت کلی غیرقابل‌چشم‌پوشی می‌کند: در چنین مواردی، باید چرخه عمر نیروگاه به‌صورت جامع پوشش داده شود. افزودن سیستم‌های جذب کربن و ذخیره آن برای نیروگاه‌های سوخت فسیلی مثال دیگری است که در آن افراد حرفه‌ای باید نگاهی به چرخه عمر نیروگاه‌ها داشته باشند.

۴-۳ چارچوب مدل‌سازی LCI و انجام فرایندهای چندوظیفه‌ای

چارچوب مدل‌سازی LCI و انجام فرایندهای چندوظیفه‌ای اغلب به انتخاب میان مدل‌سازی اختصاصی، مدل‌سازی نتیجه محور و نیز انتخاب مواد و شبکه انرژی استفاده‌شده در سیستم توسعه،محدودشده‌اند. در عمل، سیستم‌های انرژی ازنظر تعریف چارچوب مدل‌سازی LCI و انجام فرایندهای چندوظیفه‌ای با سیستم‌های دیگر تفاوتی ندارند. مثال‌هایی از فرایندهای چندوظیفه‌ای در سیستم‌های انرژی اغلب شامل تولید هم‌زمان برق و انرژی یا بازیابی موادی است که می‌توانند مرحله تولید (مواد بازیافتی استفاده‌شده برای ساخت،تولید نیروگاه‌ها، مانند توربین‌های باد) و مرحله دفع نهایی (مواد ارسال‌شده برای بازیافت مانند ماژول‌های PV، باتری‌ها و غیره) را تحت تأثیر قرار دهند. برای حل این موارد، می‌توان مراحل زیر را به‌صورت خلاصه بیان کرد:

- مطابق موقعیت‌های تصمیم‌گیری تعریف‌شده (مانند A و B، C1، C2) در تعریف هدف، درباره سازگاری هر یک از مدل‌سازی‌های اختصاصی یا نتیجه محور تصمیم‌گیری شود.
- فرایندهای چندوظیفه‌ای را مشخص کنید که برای آن‌ها زیر بخش‌ها، توسعه یا تخصیص سیستم، ضروری است.
- در موارد توسعه سیستم: تعیین شود کدام‌یک از فرایندها استفاده شود.
- در موارد تخصیص: عناصر تخصیص بکار رفته، تعریف، تعیین و توصیف گردد.

مستندسازی تفصیلی فرایندهای استفاده‌شده برای توسعه سیستم باید در بخش تحلیل LCI گزارش شود. در بخش بعد، جزئیاتی جهت رسیدگی به فرایندهای تولید هم‌زمان انرژی و شبکه‌های انرژی جانبی در سیستم توسعه بررسی می شود و نیز فناوری‌های جانبی بررسی می گردد.

۴-۳-۲ سیستم‌هایی با چشم‌انداز زمان- محور

در مطالعات آینده محور،سناریوها و فناوری‌های مختلفی را مقایسه می‌کنند، علاوه بر تعریف سناریوها، افراد حرفه‌ای در زمینه LCA باید تضمین کنند که اطلاعات LCI جمع‌آوری‌شده دارای یک چشم‌انداز هستند، مثلاً شامل توسعه فناوری آینده، تحول آینده بازار و فعالیت‌ها در آینده هستند (مثل مدیریت پسماند). یک مثال رایج، در نظر گرفتن شبکه برق متناسب با دوره زمانی جزیی ازسناریوهای تحلیل‌شده در مطالعه می باشد؛ بنابراین باید توسعه این شبکه‌ها در طول زمان انجام شود. مستندسازی فرضیات و انتخاب‌هایی که می‌توانند باعث انحراف مدل از نماینده داده‌ها شوند، در مدل‌سازی‌های آینده محور اهمیت بیشتری نسبت به مدل مطالعات کنونی دارند. هم‌چنین، تناقضات اغلب می‌توانند نتایج را به‌صورت قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهند (بنابراین باید در تحلیل حساسیت آنها را آزمایش کرد).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

۳-۳-۴ سیستم‌هایی با تغییرات فضایی

سیستم‌های انرژی شدیداً وابسته به کشور یا منطقه (محلی) هستند، مثلاً شبکه برق می‌تواند از یک کشور به کشور دیگر به‌شدت تغییر کند. مدل‌سازی سیستم‌های انرژی باید این خصوصیات جغرافیایی را با دقت خوبی پوشش دهند. فرایندهای LCI برای شبکه‌های برق، بهترین پوشش را برای پایگاه داده LCI دارند، مثلاً ۵۰ کشور مختلف در پایگاه داده اکواینونت-28] [29. اگر فرایندهای LCI به‌سادگی در دسترس نباشند، افراد حرفه‌ای در زمینه LCI باید یک فرایند جدید بسازند و یا فرایندهای موجود را با شرایط محلی و منطقه‌ای تطابق دهند (مثلاً سازگاری شبکه برق در فرایند اکواینونت برای یک کشور خاص).

۴-۴ تخصیص فرایندهای تولید هم‌زمان برق و حرارت

برای تخصیص فرایندهای تولید هم‌زمان به شاخص‌های انرژی نیاز است،بنابرین می‌توان سه روش جهت تخصیص فرایندهای تولید هم‌زمان برق و حرارت را انتخاب کرد:

۱. تخصیص همه اثرات محیط زیستی به یک خروجی، برق یا حرارت، با فرض اینکه هدف اصلی این فرایند می باشد، ۲) تخصیص مبتنی بر مقدار انرژی با فرض اینکه یک مگاژول برق معادل یک مگاژول حرارت است و استفاده از خروجی‌های برق و حرارت برای به دست آوردن عامل تخصیص، ۳) تخصیص مبتنی بر کیفیت انرژی، تشخیص کیفیت بهتر انرژی برق نسبت به حرارت، مثلاً با استفاده از اگزرژی برای خروجی‌های برق و حرارت به‌عنوان اساس تعیین عامل تخصیص [30]. اگزرژی نشان‌دهنده مقدار انرژی است که می‌تواند به کار تبدیل شود؛ درحالی‌که ضریب اگزرژی برق برابر یک است، ضریب اگزرژی حرارت دارای مقدار متغیری در بازه ۰. ۱۵-۰. ۲ است که به دمای حرارت ارسالی و دمای محیط بستگی دارد [30]. روش (۱) غیرمعمول است و در صورت استفاده باید به‌خوبی پشتیبانی گردد. روش‌های (۲) و (۳) رایج‌ترین روش‌ها برای تخصیص فرایندهای انرژی هستند. توجه کنید که تخصیص مبتنی بر کیفیت انرژی بیشتر به بار الکتریسیته مرتبط است درحالی‌که تخصیص مبتنی بر مقدار انرژی بیشتر بار را به تولید حرارت منتقل می‌کند.

۴-۵ مدل‌سازی فناوری‌های انرژی جانبی

طبق تعریف، داده‌های جانبی معرف فناوری یا فرایندی هستند که دستخوش تغییرات قرار می‌گیرد [31]. هنگام تعیین این فناوری یا فرایند، در نظر گرفتن چشم‌انداز زمانی اهمیت دارد؛ مثلاً، با افزایش تقاضای برق به علت کاهش وزش باد در یک ساعت یا یک روز خاص در کشوری مانند دانمارک که برای تولید برق خود شدیداً به توربین‌های بادی وابسته است، فناوری جانبی برای تأمین برق در آن زمان می‌تواند نیروگاه بادی باشد (و در صورت قطع شدن باد می‌تواند تغییر کند). البته این نوع فناوری جانبی کوتاه‌مدت در مطالعات LCA قرار نمی‌گیرد. استفاده از فناوری‌های جانبی باید مناسب باشد، مثلاً تخمین اینکه باد به مدت ۲ ماه از سال به‌عنوان فناوری جانبی است و ۱۰ ماه باقیمانده سال نیز باید از فناوری‌های جانبی دیگر استفاده شود. این موضوع منجر به تولید فناوری‌های جانبی ترکیبی می‌شود. این مثال‌ها فقط فناوری‌های جانبی کوتاه‌مدت را در نظر می‌گیرند، یعنی فناوری‌های موجود که پاسخگوی تغییر تقاضا هستند (بدون تأثیر بر هزینه سرمایه‌گذاری). باید این فناوری‌ها را از فناوری‌های جانبی بلندمدت متمایز کرد، مانند فناوری‌هایی که ظرفیت تولید آن‌ها متأثر از چشم‌انداز بلندمدت است (مثلاً بیشتر از ۱۰ سال)، مثلاً ازسرویس خارج کردن نیروگاه‌های قدیمی زغال‌سنگ یا نصب توربین‌های بادی جدید.

برای ارزیابی چرخه عمر یک موقعیت تعریف شده، به یک مدل‌سازی ترکیبی اختصاصی _ نتیجه محور نیاز است که از توسعه سیستم برای حل فرایند چندوظیفه‌ای بتوان استفاده کرد. این فرایندها که تحت تأثیر تغییرات ساختاری در سیستم پشتیبان قرار می‌گیرند، باید با استفاده از ترکیب چند فرایند جانبی بلندمدت مدل‌سازی شوند، درحالی‌که سایر موقعیت‌ها با استفاده از فرایندهای جانبی کوتاه‌مدت مدل می‌شوند. برای تعریف و تعیین فرایندهای جانبی کوتاه‌مدت مشکلاتی وجود دارد و تفاوت‌های فاحش در نتایج می‌تواند به علت نوع فناوری‌های جانبی منتخب باشد (مثلاً منابع انرژی تجدید پذیر در برابر منابع فسیلی). در حال حاضر هیچ اتفاق‌نظری در مورد روش‌های تعیین این فناوری‌های جانبی کوتاه‌مدت وجود ندارد. این موضوع

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

منجر به عدم قطعیت‌های مهم در فرایندهایی می‌شود که تقریباً در همه LCA ها وجود دارند. اگر فرایندهای انرژی برای خروجی مطالعه موقعیتی قطعی باشند، استفاده از سناریوهای اکتشافی برای مدل‌سازی فناوری‌های جانبی کوتاه‌مدت پیشنهاد می‌شود [32]. افراد حرفه‌ای در زمینه LCA باید این موارد را به‌عنوان بخشی از تحلیل‌های خود در نظر بگیرند که آن‌ها را قادر به ارزیابی و درک نتایج محیط زیستی مرتبط با سیستم‌های تحلیل‌شده می‌کند.

۴-۶ اهمیت تحلیل حساسیت

به‌عنوان بخشی از فاز تحلیل LCI، افراد حرفه‌ای باید زمینه را برای تحلیل حساسیت و عدم قطعیت فراهم کنند. این زمینه‌سازی می‌تواند تعیین هدف و تعیین پارامترهای اصلی باشد که باید در ارزیابی‌ها تغییر کنند. این کار یک فرایند تکرارپذیر است، یعنی تکرار فاز LCIA و نتایج به‌دست‌آمده برای اشاره به فرایندها و پارامترهای اصلی که تحت تأثیر این پارامترها قرار دارند. مانند هر مطالعه LCA، تعریف فرضیات عمده مدل‌سازی مانند تعریف فناوری‌های جانبی کوتاه‌مدت ترکیبی یا تغییر اثرات غیرمستقیم استفاده از زمین، باید به‌صورت سیستماتیک منجر به تحلیل‌های حساسیت شود. ممکن است تحلیل‌های حساسیت اضافه‌شده ناشی از استفاده عمده از LCA در فناوری‌های نوظهور یا در سیستم‌هایی باشد که به‌صورت چشم‌انداز در نظر گرفته‌شده‌اند (مثلاً ارزیابی‌های آینده محور). این مطالعات به علت استفاده از سناریوها و نامناسب بودن داده‌ها (مثلاً داده‌های مقیاس آزمایشگاهی برای فناوری انرژی نوظهور جهت نمایش یک سیستم کاملاً توسعه‌یافته در آینده)، یا حتی، به علت نقص در داده‌ها با عدم قطعیت همراه هستند. این موقعیت‌ها برای حل عدم قطعیت‌های ذاتی و موقت خود در مدل‌سازی، به تحلیل‌های حساسیت نیاز دارند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که افراد حرفه‌ای، سناریوهای اکتشافی را بر اساس همه پارامترهای اصلی وابسته به توسعه فناوری‌ها یا سیستم‌ها گسترش دهند. مثال‌هایی از این پارامترها عبارت‌اند از بازده واحدهای تولیدی، طول عمر زیرساخت، نوع و عملکرد مسیرهای دفع (بازیابی)، ضرایب نشر و غیره.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نحوه استفاده از LCA در سیستم‌ها و فناوری‌های انرژی وهمچنین چه نتایجی را می‌توان از مطالعات گسترده LCA آموخت،بررسی گردید. به علت بزرگی و تنوع سیستم‌های انرژی، می‌توان استفاده برخی از مراحل اصلی را توسعه داد؛ مثلاً پوشش جامع چرخه عمر یک سیستم (مثلاً دربرداشتن مرحله دفع یا تجزیه که اغلب از آن چشم‌پوشی می‌شود) و پوشش همه عوامل محیطی مرتبط (مثلاً تنها درصدد رفع تغییرات آب و هوایی یا سؤالات وابسته به انرژی نباشیم) در مطالعات آتی تضمین بیشتری داشته باشند. ارزیابی چرخه عمر هنوز هم حوزه تقریباً جدیدی است و روش‌های آن دائماً درحال‌توسعه هستند. از این نظر، باید در آینده روش‌های مرتبط مختلفی را برای ارزیابی چرخه عمرسیستم‌های انرژی توسعه داد و در LCA آن‌ها را پذیرفت. برخی از این روش‌ها به LCI یا سیستم مدل‌سازی وابسته هستند، مانند تغییر استفاده غیرمستقیم از زمین برای سیستم‌های زیستی (بیو)یا روش‌های ترکیبی پایدار فناوری‌های جانبی بلندمدت. سایر موارد به LCIA وابسته هستند، مثلاً ارزیابی اثرات محیط زیستی تغییرات آب‌وهوایی بر چشم‌انداز دینامیکی (مانند استفاده از سیستم‌های جذب و ذخیره کربن). وجود چشم‌اندازهای موقت در مطالعات LCA برای سیستم‌های انرژی نیز بسیار لازم است، زیرا امروزه بسیاری از سیاستگذاران، مسیرهای انرژی را برای دهه‌های آتی تعریف و تنظیم می‌کنند (مانند IEA، ۲۰۱۴) و نیازمند ارزیابی‌های پیش-بینانه‌ای هستند که اثرات ناشی از فناوری‌های کنونی و آتی را در آینده تخمین بزنند. می‌توان انتظار داشت که این توسعه به‌موازات افزایش دائمی کاربرد LCA در سیستم‌های انرژی درمقیاس بزرگ انجام می شود؛ مانند سیستم‌های تأمین برق شهری، مقیاس‌های ملی و منطقه‌ای و حمایت مؤثر و مفید از سیاستگذاران رده‌بالا در حوزه انرژی.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

مراجع

[1] IEA: World Energy Outlook 2014. International Energy Agency, Paris (2014).

[2] IPCC: Summary for policymakers. In: Edenhofer, O. , Pichs-Madruga, R. , Sokona, Y. , Farahani, E. , Kadner, S. , Seyboth, K. , Adler, A. , Baum, I. , Brunner, S. , Eickemeier, P. , Kriemann, B. , Savolainen, J. , Schlömer, S. , von Stechow, C. , Zwickel, T. , Minx, J. C. (eds.) Climate Change2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge (2014).

[3] Ciacci, L. , Fabrizio, P. (2020). Life Cycle Assessment (LCA) of Environmental and Energy Systems Energies, 13(22), 5892.

[4] Ingrao, C. , Messineo, A. , Beltramo, R. , Yigitcanlar, T. , & Ioppolo, G. (2018). How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. Journal of cleaner production, 201, 556-569.

[5] Weidema, B. P. , Bauer, C. , Hischier, R. , Mutel, C. , Nemecek, T. , Reinhard, J. ,. . . & Wernet, G. (2013). Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3.

[6] Prasad, S. , Singh, A. , Korres, N. E. , Rathore, D. , Sevda, S. , & Pant, D. (2020). Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A life cycle assessment (LCA) perspective. Bioresource technology, 303, 122964.

[7] Rashedi, A. , & Khanam, T. (2020). Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. Environmental Science and Pollution Research, 27, 29075-29090.

[8] Mayer, F. D. , Brondani, M. , Carrillo, M. C. V. , Hoffmann, R. , & Lora, E. E. S. (2020). Revisiting energy efficiency, renewability, and sustainability indicators in biofuels life cycle: analysis and standardization proposal. Journal of Cleaner Production, 252, 119850.

[9] Dandres, T. , Gaudreault, C. , Tirado-Seco, P. , & Samson, R. (2011). Assessing non-marginal variations with consequential LCA: Application to European energy sector. Renewable and sustainable energy reviews, 15(6), 3121-3132.

[10] Smith, C. , Burrows, J. , Scheier, E. , Young, A. , Smith, J. , Young, T. , & Gheewala, S. H. (2015). Comparative Life Cycle Assessment of a Thai Island's diesel/PV/wind hybrid microgrid. Renewable Energy, 80, 85-100.

[11] Evin, D. , & Ucar, A. (2019). Energy impact and eco-efficiency of the envelope insulation in residential buildings in Turkey. Applied Thermal Engineering, 154, 573-584.

[12] Sharara, M. , Kim, D. , Sadaka, S. , Thoma, G. (2019). Consequential life cycle assessment of swine manure management within a thermal gasification scenario. Energies, 12, 4081.

[13] Chatzisideris, M. D. , Espinosa, N. , Laurent, A. , & Krebs, F. C. (2016). Ecodesign perspectives of thin-film photovoltaic technologies: A review of life cycle assessment studies. Solar Energy Materials and Solar Cells, 156, 2-10.

[14] Espinosa, N. , Laurent, A. , & Krebs, F. C. (2015). Ecodesign of organic photovoltaic modules from Danish and Chinese perspectives. Energy & Environmental Science, 8(9), 2537-2550.

[15] Widiyanto, A. , Kato, S. , & Maruyama, N. (2002). A LCA/LCC optimized selection of power plant system with additional facilities options. J. Energy Resour. Technol. , 124(4), 290-299.

[16] Schreiber, A. , Zapp, P. , & Marx, J. (2012). Meta- analysis of life cycle assessment studies on electricity generation with carbon capture and storage. Journal of Industrial Ecology, 16, S155-S168.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

[17] Horodytska, O. , Kiritsis, D. , & Fullana, A. (2020). Upcycling of printed plastic films: LCA analysis and effects on the circular economy. Journal of Cleaner Production, 268, 122138.

[18] Frischknecht, R. , Althaus, H. -J. , Bauer, C. , Doka, G. , Heck, T. , Jungbluth, N. , Kellenberger, D. , Nemecek, T. (2007). " The environmental relevance of capital goods in life cycle assessments of products and services" , Int. J. Life Cycle Assess, 12: 7–17.

[19] Herceg, S. , Pinto Bautista, S. , Weiß, K. -A. (2020). Influence of waste management on the environmental footprint of electricity produced by photovoltaic systems. Energies, 13, 2146.

[20] Weiss, M. , Haufe, J. , Carus, M. , Brandão, M. , Bringezu, S. , Hermann, B. , Patel, M. K. (2012). "A review of the environmental impacts of biobased materials". 16: S169–S181.

[21] Bonamente, E. , Aquino, A. (2020). Environmental performance of innovative ground-source heat pumps with pcm energy storage. Energies, 13, 117.

[22] Ryberg, M. W. , Owsianiak, M. , Laurent, A. , & Hauschild, M. Z. (2015). Power generation from chemically cleaned coals: do environmental benefits of firing cleaner coal outweigh environmental burden of cleaning?. Energy & Environmental Science, 8(8), 2435-2447.

[23] Hellweg, S. , & i Canals, L. M. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. Science, 344(6188), 1109-1113.

[24] Piasecka, I. , Bałdowska-Witos, P. , Flizikowski, J. , Piotrowska, K. , & Tomporowski, A. (2020). Control the system and environment of post-production wind turbine blade waste using life cycle models. Part 1. Environmental transformation models. Polymers, 12(8), 1828.

[25] Bhandari, K. P. , Collier, J. M. , Ellingson, R. J. , & Apul, D. S. (2015). Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47, 133-141.

[26] Davidsson, S. , Höök, M. , & Wall, G. (2012). A review of life cycle assessments on wind energy systems. The International Journal of Life Cycle Assessment, 17(6), 729-742.

[27] Nabi Javid, M. , Esparham, A. (2021). A review of life cycle assessment (LCA) in quantifying environmental impacts of OPC and PFA concrete products. Civil and Project Journal, 3(2), 22-31.

[28] Treyer, K. , Bauer, C. (2013). "Life cycle inventories of electricity generation and power supply in version3 of the ecoinvent database—part I" ,electricity generation, Int. J. Life Cycle Assess.

[29] Xu, L. , Fuss, M. , Poganietz, W. R. , Jochem, P. , Schreiber, S. , Zoephel, C. , & Brown, N. (2020). An Environmental Assessment Framework for Energy System Analysis (EAFESA): The method and its application to the European energy system transformation. Journal of Cleaner Production, 243, 118614.

[30] Fruergaard, T. , Astrup, T. , & Ekvall, T. (2009). Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions. Waste Management & Research, 27(8), 724-737.

[31] Weidema, B. P. , Frees, N. , & Nielsen, A. M. (1999). Marginal production technologies for life cycle inventories. The International Journal of Life Cycle Assessment, 4(1), 48-56.

[32] Chowdhury, J. I. , Balta-Ozkan, N. , Goglio, P. , Hu, Y. , Varga, L. , & McCabe, L. (2020). Techno-environmental analysis of battery storage for grid level energy services. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 131, 110018.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]

چکیده انگلیسی:

Analysis of environmental hotspots of energy supply systems with life cycle assessment approach

Ali Reza Esperhem[1*], Elham Ebrahimi[2]

1*- Department of Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2-Faculty of Industrial Engineering and Management Systems, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: August 2021 Accepted: December 2021

Abstract

Energy systems, despite their key roles and diversity, have serious implications for human health, ecosystems, and natural resources; Thus, in the last two decades, the focus of more than 1,000 LCA studies on energy systems has been to determine and mitigate these effects. This paper examines the applications of LCA in energy and heat generation energy systems to determine environmental hotspots, as well as brief and important information about 1) methodology, including defining the objectives and scope of studies, covering the system life cycle, and Environmental Impacts; 2) The main findings of these studies, especially with the aim of determining environmental hotspots and patterns of effects in different energy sources, are presented. In this article, an attempt has been made to review the recommendations and guidelines in the field of LCA on the main aspects of the methodology in order to properly guide LCA studies on energy systems and the reliability of LCA results.

Key words: Life Cycle Assessment (LCA), Energy Supply Systems, Renewable Energy, Energy Technologies, Power Plants, Greenhouse Gas Emissions (CHG).

*corresponding author: **Alireza.esparham@ut.ac.ir**

Cite this article as: Ali Reza Esperhem, Elham Ebrahimi, Analysis of environmental hotspots of energy supply systems with life cycle assessment approach. Journal of Energy Conversion, 2022, 8(4), 27-44.
DOR**:** **20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.4.4.4]