DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504 Published by Vesnu Publications

Journal of Health System Research Vol. 19, No. 3, Autumn

Received: 04.01.2022 Accepted: 23.11.2022 Published: 07.10.2023

Life Cycle Assessment of the Sponge Iron Production Process Using OpenLCA Software: A Case Study of Khuzestan Steel Plant, Iran

Maziar Ramezani-Mooziraji[1], Ghorbanali Dezvareh[2]

Original Article

Abstract

Background: Since sponge iron is the main feed of steel furnaces for the production of crude steel, especially in electric arc furnaces, the production of quality sponge iron is one of the concerns of the steel industry. The reduction process, which is the conversion of pellets into sponge iron using reduction gases, has been used in Iran for many years. Therefore, there is a necessity for a proper environmental assessment to reach the minimum level of negative impact on the environment. This study aims to investigate the environmental impacts of sponge iron production by Midrex method using natural gas and to compare the effects associated with different production processes. This paper identifies the processes and significant inputs that affect the environmental impact of sponge iron production and proposes effective methods to diminish contamination.

Methods: The OpenLCA software with the Ecoinvent database was used by using IMPACT 2002+ evaluation method. Life cycle inventory data were obtained from the average performance of factories in one year, and 1 ton of produced sponge iron was considered as the functional unit.

Findings: Among different types of environmental impacts, non-renewable energy, mineral particle respiration, and global warming had the most significant effects, respectively. These three categories of impact together accounted for about 87.5% of the total environmental impact of the whole process. Among the processes, the greatest impacts were related to the production of sponge iron (62.8%), followed by the pellet production process (37.8%), and the greatest environmental impacts of input materials were related to natural gas (44.3%) and iron ore (23.9%), respectively.

Conclusion: Despite significant advances in sponge iron industries in recent decades, they still have high energy consumption as well as mineral particles and carbon dioxide emissions. Conducting a life cycle assessment allows producers to identify the most polluting processes in order to make the necessary plans to improve them.

Keywords: Life cycle stages; Midrex; Environmental pollution; Iron; Steel; Pellet

Citation: Ramezani-Mooziraji M, Dezvareh G. **Life Cycle Assessment of the Sponge Iron Production Process Using OpenLCA Software: A Case Study of Khuzestan Steel Plant, Iran.** J Health Syst Res 2023; 19(3): 200-8.

1- Department of Environment, School of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Assistant Professor, Department of Environment, School of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
Corresponding Author: Maziar Ramezani-Mooziraji; Department of Environment, School of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran; Email: maziar.ramezani.mooziraji@gmail.com

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504]

DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504 Published by Vesnu Publications

ارزیابی چرخه حیات فرایند تولید آهن اسفنجی با استفاده از نرم‌افزار OpenLCA: مطالعه موردی کارخانه فولاد خوزستان

مازیار رمضانی موزیرجی[1]، قربانعلی دزواره[2]

مقاله پژوهشی

چکیده

مقدمه: از آن‌جایی که آهن اسفنجی خوراک اصلی کوره‌های فولادسازی به ویژه کوره‌های قوس الکتریکی (Electric arc furnaces یا EAFs) جهت تولید فولاد خام است، تولید باکیفیت آن، از جمله دغدغه‌های صنعت فولاد می‌باشد. فرایند احیا شامل تبدیل گندله به آهن اسفنجی با استفاده از گازهای احیایی، سال‌هاست در ایران مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، باید ارزیابی زیست محیطی درستی انجام شود تا کمترین اثرات منفی را بر محیط زیست داشته باشد. هدف از انجام پژوهش حاضر، ارزیابی چرخه حیات تولید آهن اسفنجی به روش Midrex با استفاده از گاز طبیعی در ایران و مقایسه تأثیرات مرتبط با فرایندهای مختلف تولید بود. مطالعه عمده فرایندها و ورودی‌های تأثیرگذار بر اثرات زیست محیطی تولید آهن اسفنجی را مشخص و روش‌های مؤثر برای جلوگیری از آلودگی را پیشنهاد نمود.

روش‌ها: در این مطالعه، از نرم‌افزار OpenLCA با پایگاه داده Ecoinvent و روش ارزیابی IMPACT2002+ استفاده شد. داده‌های موجودی چرخه عمر، از میانگین عملکرد کارخانجات در مدت یک سال تهیه گردید و واحد عملکردی نیز یک تن آهن اسفنجی تولید شده در نظر گرفته شد.

یافته‌ها: در میان اثرات زیست محیطی، «انرژی غیر تجدید شونده، تنفس ذرات معدنی و گرمایش جهانی» به ترتیب بیشترین اثرات را داشتند؛ به طوری که این سه دسته تأثیر، در مجموع ۸۷/۵ درصد از کل اثرات زیست محیطی را شامل شد. در میان فرایندها نیز بیشترین اثرات مربوط به تولید آهن اسفنجی (۶۲/۸ درصد) بود و پس از آن، فرایند تولید گندله با سهیم بودن ۳۷/۸ درصد در جایگاه بعدی قرار داشت. بیشترین اثرات زیست محیطی حاصل از مواد ورودی نیز به ترتیب شامل گاز طبیعی (۴۴/۳ درصد) و سنگ آهن (۲۳/۹ درصد) بود.

نتیجه‌گیری: با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در صنایع تولید آهن اسفنجی در دهه‌های اخیر، هنوز مصرف انرژی، انتشارات ذرات معدنی و تولید کربن دی‌اکسید زیادی دارند. انجام یک ارزیابی چرخه حیات به تولیدکنندگان امکان شناسایی فرایندهایی که بیشترین آلودگی را دارند، می‌دهد تا برای بهبود آن برنامه‌ریزی‌های لازم انجام شود.

واژه‌های کلیدی: مراحل چرخه حیات؛ Midrex؛ آلودگی زیست محیطی؛ آهن؛ فولاد؛ پلیت

ارجاع: رمضانی موزیرجی مازیار، دزواره قربانعلی. **ارزیابی چرخه حیات فرایند تولید آهن اسفنجی با استفاده از نرم‌افزار OpenLCA: مطالعه موردی کارخانه فولاد خوزستان.** مجله تحقیقات نظام سلامت ۱۴۰۲؛ ۱۹ (۳): ۲۰۸-۲۰۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۷/۱۵

مقدمه

از آن‌جایی که آهن اسفنجی خوراک اصلی کوره‌های فولاد سازی به ویژه کوره‌های قوس الکتریکی (Electric arc furnaces یا EAFs) جهت تولید فولاد خام است، تولید باکیفیت آن از جمله دغدغه‌های صنعت فولاد به شمار می‌رود. فرایند احیا شامل تبدیل گندله به آهن اسفنجی با استفاده از گازهای احیایی، سال‌هاست در ایران مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، وجود منابع گاز طبیعی و ذخایر سنگ آهن، از دلایل عمده آن می‌باشد. فرایند احیای مستقیم بر اساس نوع احیاکننده، به دو گروه بر پایه زغال سنگ و بر پایه گاز طبیعی تقسیم می‌شود. انتخاب یکی از دو روش فوق، به محل قرارگیری کارخانه تولیدکننده و منابع موجود در دسترس بستگی دارد. ایران به سبب وجود منابع سرشار گاز، از روش احیای مستقیم بر پایه گاز در تولید آهن اسفنجی استفاده می‌کند.ایران در سال ۲۰۱۹ با تولید ۲۸/۵۲ میلیون تن آهن اسفنجی که تمام آن بر پایه گاز بود، پس از هند با تولید ۳۳/۷۴ میلیون تن آهن اسفنجی که ۲۷/۸۱ میلیون تن آن بر پایه زغال سنگ بود، در جایگاه دوم قرار گرفت (۱).

تولید آهن اسفنجی با وجود تأثیر بسزایی که بر اقتصاد کشور دارد، نیازمند مصرف انرژی زیادی نیز می‌باشد و تولید آن با انتشار میزان قابل توجهی گاز گلخانه‌ای همراه است (۳، ۲). بدین ترتیب، تأثیرات زیست محیطی چشمگیری به همراه دارد. با توجه به رشد مخاطرات زیست محیطی در جهان، بررسی‌ها در کشورهای توسعه یافته حاکی از تقاضای مصرف‌کنندگان برای تولیدات با تأثیر بسیار کم بر محیط زیست می‌باشد (۴). بر این اساس، یکی از روش‌های جامع بررسی اثرات زیست محیطی، روش ارزیابی چرخه حیات است که در آن میزان مصرف منابع فسیلی، تغییر کاربری اراضی و تمام آلاینده‌های انتشار یافته به هوا، آب و خاک (بررسی چرخه حیات مبتنی بر ارزیابی دو شاخص مهم میزان مصرف منابع و انتشارات آلاینده‌ها می

۱- کارشناس ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲- استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
نویسنده مسؤول: مازیار رمضانی موزیرجی؛ کارشناس ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
Email: maziar.ramezani.mooziraji@gmail.com

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504]

باشد) به طور کامل و همزمان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (۶، ۵). از طریق تجزیه و تحلیل ارزیابی چرخه حیات، تمام بارهای زیست محیطی احتمالی یک محصول و فرایندهای مختلف تولید در تعدادی از اثرات زیست محیطی (پتانسیل تخریب ازن، پتانسیل گرم شدن زمین، سمیت برای انسان و...) طبقه‌بندی می‌شود. همچنین، ارزیابی چرخه حیات را می‌توان برای مقایسه تأثیرات زیست محیطی محصولات مختلف استفاده کرد و یا آن را برای مقایسه فرایندهای مختلف تولید به کار برد. بنابراین، ارزیابی چرخه حیات به منظور تعیین نقاط بحرانی اثرات زیست محیطی (مراحلی که بیشترین آسیب را به محیط زیست وارد می‌کنند) در چرخه حیات یک محصول یا فرایند، مورد استفاده قرار می‌گیرد و با کمک آن می‌توان فرایند یا محصول را ارتقا داد (۸، ۷).

تاکنون مطالعات ارزیابی چرخه حیات زیادی در زمینه صنعت آهن و فولاد انجام شده است. Olmez و همکاران تولید آهن و فولاد ترکیه را بررسی کردند (۹). Burchart-Korol نیز ارزیابی چرخه حیات فولاد لهستان با دو روش کوره بلند و EAF با ورودی تمام قراضه را مورد بررسی قرار داد (۱۰). همچنین، Li و همکاران ارزیابی چرخه حیات تولید فولاد از طریق EAF که ورودی کوره ترکیبی از آهن قراضه و آهن اسفنجی بر پایه زغال سنگ بود، را انجام دادند و دریافتند که ۵۸ درصد از اثرات زیست محیطی تولید یک تن فولاد مذاب را آهن اسفنجی شامل می‌شود (۱۱). پژوهش اختصاصی ارزیابی چرخه حیات برای فرایند تولید آهن اسفنجی به فراوانی فرایند تولید فولاد نیست و تنها یک مطالعه توسط Elango انجام شده که ارزیابی چرخه حیات تولید آهن اسفنجی با استفاده از زغال سنگ در هند را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده است که برای تولید یک تن آهن اسفنجی در هند، ۲۷/۵۱ گیگاژول انرژی مصرف می‌شود و پتانسیل گرمایش جهانی آن نیز ۱/۴ تن کربن دی‌اکسید به ازای تولید یک تن محصول می‌باشد (۱۲). غیر از مورد فوق، تحقیق دیگری که تأثیرات زیست محیطی تولید آهن اسفنجی را بر حسب ورودی‌ها و انتشارات آن به صورت کمی گزارش کند، وجود ندارد.

مطالعه اختصاصی تولید آهن اسفنجی در ایران از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چرا که ایران یکی از تولیدکنندگان عمده آهن اسفنجی در جهان می‌باشد و بسیاری از صنایع تولید فولاد آن، از آهن اسفنجی به عنوان عمده ورودی خود استفاده می‌کنند. پژوهش‌هایی در ایران در مورد آهن اسفنجی انجام شده است که بیشتر به تأثیر شاخص‌های ورودی بر کیفیت یا مقایسه فن‌آوری‌های ورودی بر ویژگی‌های آهن اسفنجی پرداخته‌اند. برای درک فرصت‌ها و چالش‌های واقعی در طول سال‌های رشد آینده این بخش، یک ارزیابی چرخه حیات قوی که تنوع فرایند، تأثیر آن بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به تصویر می‌کشد، ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین هدف از انجام مطالعه حاضر، انجام یک تحقیق خاص ارزیابی چرخه حیات برای صنعت تولید آهن اسفنجی در ایران و درک تأثیرات زیست محیطی مرتبط با تمام مراحل فرایندهای تولید آهن اسفنجی و محصول نهایی به طور همزمان با استفاده از نرم‌افزار OpenLCA نسخه 1.9 بود. انتظار می‌رود یافته‌های پژوهش حاضر منجر به تعیین بهترین فرصت‌ها برای کاهش تأثیرات آینده در تولید آهن اسفنجی شود و در قالب یک مطالعه موردی و واقعی مورد توجه خوانندگان قرار گیرد.

روش‌ها

بر اساس استاندارد International Organization for Standardization (ISO 14040)، روش ارزیابی چرخه حیات متشکل از چهار بخش می‌باشد.

۱- بیان دامنه و هدف: در مرحله تعیین هدف و دامنه کاربرد، در مورد چرایی (هدف) و چگونگی (دامنه کاربرد) یک مطالعه ارزیابی چرخه حیات بحث می‌شود. هدف و دامنه ارزیابی یک چرخه حیات باید به وضوح تعیین شود و باید با کاربرد مورد نظر مطالعه سازگار باشد. تعریف هدف و دامنه کاربرد، باعث حرکت در مسیر صحیح کل فرایند به دستیابی به معنی‌دارترین نتایج می‌شود.

۲- تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سامانه: فهرست ورودی‌ها و خروجی‌های چرخه حیات (Life cycle inventory یا LCI) شامل جمع‌آوری داده‌ها و انجام محاسبات به منظور کمی‌سازی ورودی‌ها و خروجی‌های چرخه حیات محصول می‌باشد و در واقع، قلب روش ارزیابی چرخه حیات به شمار می‌رود. جمع‌آوری صحیح و دقیق داده‌ها، در این گام از ارزیابی چرخه حیات انجام می‌شود.

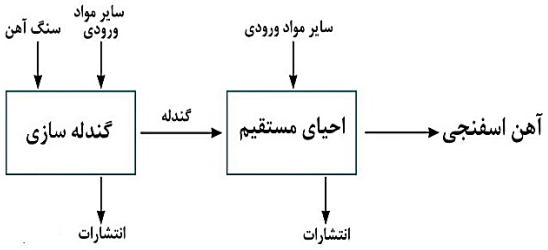
۳- ارزیابی اثرات زیست محیطی: ارزیابی پیامد چرخه حیات (LCIA یا Life cycle impact assessment) بخشی از ارزیابی چرخه حیات است که هدف آن دریافتن و ارزیابی بزرگی و اهمیت پیامدهای بالقوه زیست محیطی یک سیستم به واسطه چرخه حیات آن محصول می‌باشد.

۴- تفسیر نتایج: آخرین بخش از مطالعه ارزیابی چرخه حیات است که در آن نتایج به دست آمده به صورت ترکیبی منابع بحرانی پیامدها و گزینه‌هایی برای کاهش آن‌ها ارایه می‌دهد (۱۳).

تعیین دامنه و هدف

هدف مطالعه حاضر، بررسی اثرات زیست محیطی تولید آهن اسفنجی با استفاده از گاز طبیعی و مقایسه تأثیرات مرتبط با فرایندهای مختلف تولید بود. روش‌های مختلفی برای احیای سنگ آهن وجود دارد که از مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها، روش Midrex می‌باشد و در ایران نیز فراگیر است. نمونه مورد بررسی، کارخانه فولاد خوزستان واقع در استان خوزستان، شهرستان اهواز، کیلومتر ۱۰ جاده بندر امام خمینی با تناژ تولیدی سالانه بیش از ۵/۵ میلیون تن بود که از عمده تولیدکنندگان آهن اسفنجی در کشور می‌باشد و از روش Midrex برای تولید آهن اسفنجی استفاده می‌کند.

واحد عملکردی، یک مفهوم کلیدی در مطالعات ارزیابی چرخه حیات می‌باشد که مقایسه تولیدات و خدمات مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد. واحد عملکردی در پژوهش حاضر بر پایه جرم می‌باشد و به صورت یک تن آهن اسفنجی انتخاب شده است. شکل ۱ مرز سیستم با نمودار جریان فرایند تولید آهن اسفنجی و ورودی و خروجی‌های مربوط در طی هر مرحله از فرایند تولید آهن اسفنجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مرز سامانه تولید آهن اسفنجی

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504]

موجودی داده

این بخش یکی از مهم‌ترین مراحل در بررسی ارزیابی چرخه حیات می‌باشد؛ چرا که استفاده از داده‌های قدیمی و منسوخ، منجر به نتیجه‌گیری نادرست می‌شود. بنابراین، در تحقیق حاضر سال ۱۴۰۰ به عنوان سال مرجع انتخاب و داده‌ها با استفاده از یک مطالعه میدانی از میانگین عملکرد کارخانه در طول یک سال تهیه گردید. مراحل ساخت کارخانه و مراحل استفاده و پایان عمر از ارزیابی چرخه حیات حذف شد. مقادیر برخی از داده‌های مربوط به فاضلاب و گرد و غبار به دلیل نبود داده کافی از پایگاه داده موجود در نرم‌افزار دریافت گردید. جدول ۱ ورودی و خروجی‌های فرایندها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ورودی و خروجی‌های تولید یک تن آهن اسفنجی

ورودی‌ها و خروجی‌ها	واحد	گندله	آهن اسفنجی
ورودی‌ها			
آهک	کیلوگرم	۷/۲۰	۰/۵۰
سنگ آهن	تن	۱/۰۲	–
بنتونیت	کیلوگرم	۵/۷٤	–
گاز طبیعی	مترمکعب	۱٦/۹۵	۲٦۰/۰۰
الکتریسیته	کیلووات ساعت	۳۹/۰۰	۱۰۷/۰۰
آب خنک‌سازی	مترمکعب	۰/۱۲	۱/٤۰
اکسیژن	کیلوگرم	–	۲۲/۰۰
گندله	تن	–	۱/٤۰
خروجی‌ها			
گندله	تن	۱	–
آهن اسفنجی	تن		۱/۰
انتشارات			
کربن دی‌اکسید	کیلوگرم	۲٤/۳۵	۲۹۳/۰۰
کربن مونوکسید	کیلوگرم	۰/۲۰	۱/۱٦
سولفور دی‌اکسید	کیلوگرم	۰/۱۳	۰/۰٦
نیتروژن دی‌اکسید	کیلوگرم	۰/۳۱	۰/۰۵
گرد و خاک	کیلوگرم	۳/٤۰	۱/۱٤
فاضلاب	مترمکعب	۰/۰۱	۰/۰۷

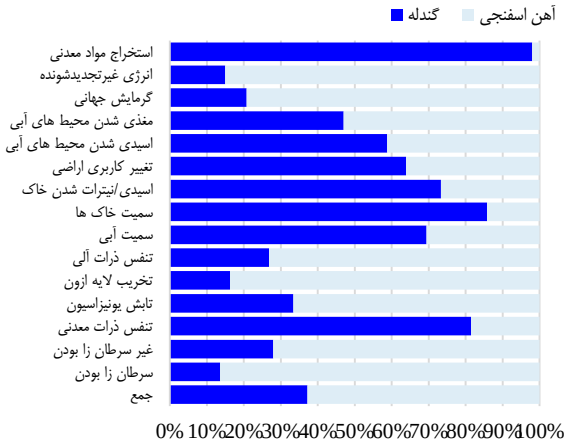
روش ارزیابی چرخه حیات

ارزیابی چرخه حیات تولید آهن اسفنجی با استفاده از نرم‌افزار OpenLCA به همراه پایگاه داده Ecoinvent نسخه 3.5 انجام شد. مطابق با ISO 14042، ارزیابی چرخه حیات را می‌توان با استفاده از چهار مرحله «طبقات اثر، تعیین ویژگی، نرمال‌سازی و وزن‌دهی» که دو مرحله اول اجباری و بقیه اختیاری می‌باشد، انجام داد. در پژوهش حاضر، روش ارزیابی IMPACT2002+ نسخه 2.15 به دلیل این که علاوه بر در نظر گرفتن طبقات اثر محیط زیستی، اثرات بهداشتی و سلامت انسان را نیز محاسبه می‌کند، انتخاب گردید. این روش دارای ۱۵ شاخص میانی یا شاخص طبقه‌بندی (انرژی غیر تجدید شونده، تخریب لایه ازن و...) می‌باشد که در نهایت، در قالب چهار شاخص نهایی (سلامتی انسان‌ها، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیم و منابع) قرار می‌گیرد (۱۴).

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

یافته‌ها

نتایج ارزیابی زیست محیطی یک تن آهن اسفنجی با توجه به سهم هر فرایند در جدول ۲ و شکل ۲ ارایه شده است. نتایج نرمال شده نیز در جدول ۳ و شکل ۳ آمده است. به منظور بررسی اثرات فرایند در تولید یک تن محصول، ورودی حاصل از فرایند قبلی در نظر گرفته نشد؛ به این صورت که فرایند آهن اسفنجی بدون ورودی تولید گندله در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. سهم هر یک از فرایندها در شاخص میانی زیست محیطی تولید یک تن آهن اسفنجی

در شکل ۴ بیشترین اثرات زیست محیطی حاصل از مواد ورودی برای تولید یک تن فولاد نورد ارایه شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ نیز نتایج نرمال شده و نمره منفرد مربوط به تولید یک تن فولاد نورد با توجه به مواد ورودی نشان داده شده است.

بحث

بر اساس نتایج پژوهش حاضر، میزان کل اثرات زیست محیطی، ۰/۲۶۰۰ pt بود که ۰/۰۹۹۶ pt آن مربوط به انرژی غیر تجدید شونده و ۰/۰۷۰۴ pt آن مربوط به تنفس ذرات معدنی بود و گرمایش جهانی هم ۰/۰۵۷۴ pt به دست آمد و این سه دسته تأثیر در مجموع، ۸۷/۵ درصد از کل تأثیرات زیست محیطی را شامل شد.

در طی تولید یک تن محصول، ۶۲/۸ درصد اثرات مربوط به فرایند تولید آهن اسفنجی می‌باشد که عمده آن به دلیل مصرف زیاد گاز مصرفی است و در مراحل بعدی به دلیل تأثیرات ناشی از انتشارات مستقیم خروجی از این فرایند و مصرف برق می‌باشد. ۳۷/۲ درصد از کل اثرات را تولید گندله در برمی‌گیرد که عمده دلیل آن، مصرف سنگ آهن و تأثیرات حاصل از انتشارات مستقیم و مصرف برق می‌باشد.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]
[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504]

جدول ۲. نتایج ارزیابی بر اساس سهم هر فرایند چرخه حیات تولید یک تن آهن اسفنجی

گروه تأثیر	واحد	گندله	آهن اسفنجی	جمع
سرطان‌زا بودن	kg C2H3Cl eq	٦/٢٨	٤٠/٠٠	٤٦/٢٠
غیر سرطان‌زا بودن	kg C2H3Cl eq	٢/٦٣	٦/٧٨	٩/٤١
تنفس ذرات معدنی	kg PM2.5 eq	٠/٥٨	٠/١٣	٠/٧١
تابش یونیزاسیون	Bq C-14 eq	٦٧٠/٠٠	١/٣٤e^{٣}	٢/٠١e^{٣}
تخریب لایه ازن	kg CFC-11 eq	١/٣٨e$^{-٥}$	٧/١٢e$^{-٥}$	٨/٥٠e$^{-٥}$
تنفس ذرات آلی	kg C2H4 eq	٠/٠٦	٠/١٧	٠/٢٣
سمیت آبی	kg TEG water	٦/٨٢e^{٤}	٣/٠١e^{٤}	٩/٨٣e^{٤}
سمیت خاک‌ها	kg TEG soil	١/٣٨e^{٤}	٢/٢٩e^{٣}	١/٦١e^{٤}
اسیدی/ نیترات شدن خاک	kg SO2 eq	٧/٤٣	٢/٧١	١٠/١٠
تغییر کاربری اراضی	m2org.arable	٠/٩٦	٠/٥٤	١/٥١
اسیدی شدن محیط‌های آبی	kg SO2 eq	١/٣٠	٠/٩١	٢/٢١
مغذی شدن محیط‌های آبی	kg PO4 P-lim	٠/٠١	٠/٠١	٠/٠٣
گرمایش جهانی	kg CO2 eq	١١٨/٠٠	٤٥٠/٠٠	٥٦٨/٠٠
انرژی غیر تجدید شونده	MJ primary	٢/٢٦e^{٣}	١/٢٩e^{٤}	١/٥١e^{٤}
استخراج مواد معدنی	MJ surplus	٥٦/٨٠	١/١٦	٥٧/٩٠

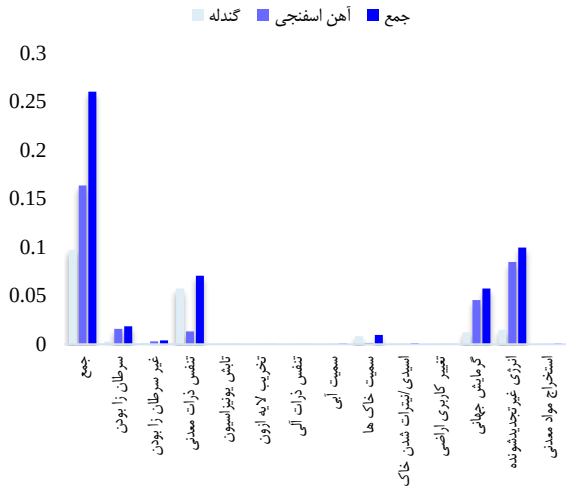
eq که مخفف Equivalent به معنی معادل می‌باشد؛ یعنی واحد سرطان‌زا بودن برابر است با معادل کیلوگرم C2H3Cl

جدول ۳. نتایج ارزیابی نرمال شده بر اساس سهم هر فرایند چرخه حیات تولید یک تن آهن اسفنجی

گروه تأثیر	گندله	آهن اسفنجی	جمع
سرطان‌زا بودن	٠/٠٠٢٥	٠/٠١٥٨	٠/٠١٨٣
غیر سرطان‌زا بودن	٠/٠٠١٠	٠/٠٠٢٧	٠/٠٠٣٧
تنفس ذرات معدنی	٠/٠٥٧٣	٠/٠١٣٠	٠/٠٧٠٤
تابش یونیزاسیون	١/٩٨٠٠e$^{-٥}$	٣/٩٦٠٠e$^{-٥}$	٥/٩٤٠٠e$^{-٥}$
تخریب لایه ازن	٢/٠٥٠٠e$^{-٦}$	١/٠٥٠٠e$^{-٥}$	١/٢٦٠٠e$^{-٥}$
تنفس ذرات آلی	١/٨٤٠٠e$^{-٥}$	٥/٠٢٠٠e$^{-٥}$	٦/٨٥٠٠e$^{-٥}$
سمیت آبی	٢/٥٠٠٠e$^{-٤}$	١/٠٥٠٠e$^{-٤}$	٠/٠٠٠٤
سمیت خاک‌ها	٠/٠٠٨٠	٠/٠٠١٣	٠/٠٠٩٣
اسیدی/ نیترات شدن خاک	٥/٦٤٠٠e$^{-٤}$	٢/٠٦٠٠e$^{-٤}$	٠/٠٠٠٨
تغییر کاربری اراضی	٧/٦٦٠٠e$^{-٥}$	٤/٣٣٠٠e$^{-٥}$	٠/٠٠٠١
گرمایش جهانی	٠/٠١١٩	٠/٠٤٥٥	٠/٠٥٧٤
انرژی غیر تجدید شونده	٠/٠١٤٩	٠/٠٨٤٨	٠/٠٩٩٦
استخراج مواد معدنی	٣/٧٤٠٠e$^{-٤}$	٧/٦٣٠٠e$^{-٦}$	٣/٨٠٠١e$^{-٤}$
جمع	٠/٠٩٧٠	٠/١٦٠	٠/٢٦٠٠

واحد: Point

در فرایند تولید آهن اسفنجی نیز کل تأثیرات، ۰/۱۶۳ pt به دست آمد که بیشتر از نصف آن (۵۱/۸ درصد، ۰/۰۹۵۱ pt) مربوط به انرژی غیر تجدید شونده می‌باشد و تأثیرات مربوط به گرمایش جهانی با ۰/۰۵۱ pt در جایگاه بعدی قرار گرفت. همچنین، فرایند تولید گندله ۰/۰۹۷۹ pt از تأثیرات کل را به خود اختصاص داد که حدود ۶۰ درصد آن (۰/۰۵۷۳ pt) را تنفس ذرات معدنی شامل می‌شود (شکل ۳).

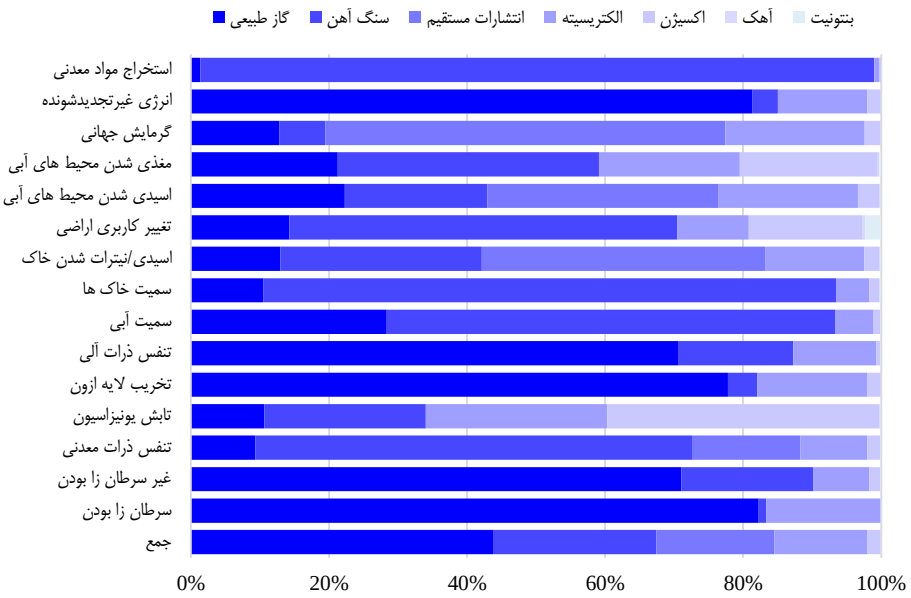


شکل ۳. سهم هر یک از فرایندها در شاخص میانی نرمال شده زیست محیطی تولید یک تن آهن اسفنجی

بیشترین اثرات زیست محیطی حاصل از مواد ورودی به ترتیب شامل گاز طبیعی، سنگ آهن و اثرات ناشی از انتشارات مستقیم می‌باشد (شکل ۴).

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504]



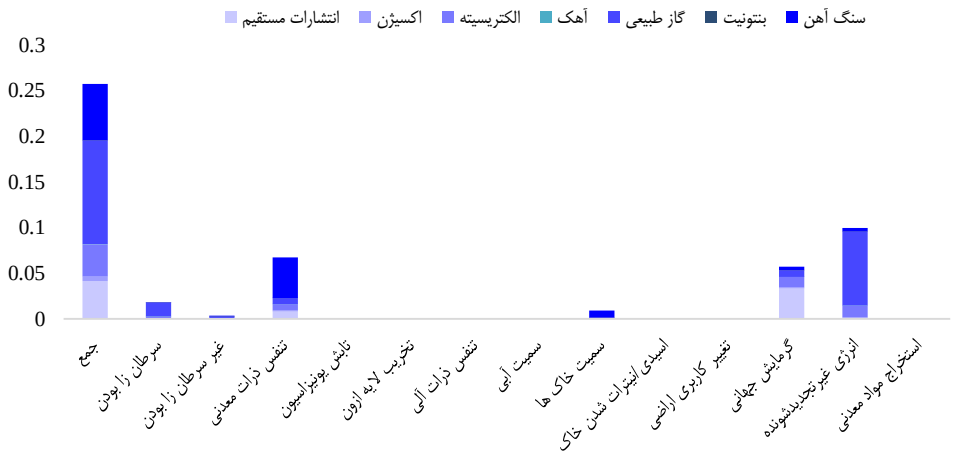
شکل ۴. سهم هر یک از نهاده‌های ورودی در شاخص میانی زیست محیطی تولید یک تن آهن اسفنجی

مصرف گاز با pt ۰/۱۱۴ (۴۴/۳ درصد) در رده نخست قرار داشت و به دنبال آن، سنگ آهن با pt ۰/۰۶۱۶ (۲۳/۹ درصد) در جایگاه بعدی بود. همچنین، اثرات ناشی از انتشارات مستقیم (۱۶/۱ درصد) و مصرف برق (۱۳/۷ درصد) به ترتیب جایگاه‌های سوم و چهارم را به خود اختصاص دادند که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. اثرات حاصل از گاز مصرفی، سنگ آهن و اثرات ناشی از انتشارات مستقیم در مجموع حدود ۸۵ درصد از کل تأثیرات را تشکیل داد.

ابزارهای مختلفی برای انجام ارزیابی چرخه حیات وجود دارد و ممکن است بسته به نوع نرم‌افزار انتخابی، نتایج متفاوت باشد. به همین دلیل، با استفاده از نرم‌افزار Simapro نسخه 9.0.0.48، پایگاه داده Ecoinvent و روش ارزیابی IMPACT2002+ نیز خروجی گرفته شد و نتایج با هم مقایسه شد و تفاوت آن‌ها با دو رقم اعشار در جدول ۴ ارایه شده است. با توجه به نتایج ۱۴ تا از ۱۵ تا دسته تأثیر تا دو رقم اعشار اختلافی با هم نداشتند. این مقدار تطابق با توجه به یکسان بودن نوع پایگاه داده و روش استفاده شده قابل انتظار بود، اما در تغییر کاربری اراضی مقدار خروجی نرم‌افزار Simapro ۱/۴۶ برابر نرم‌افزار OpenLCA به دست آمد. یک دلیل محتمل می‌تواند به دلیل تفاوت نسخه روش استفاده شده باشد.

پیشنهاد برای تولید پایدار

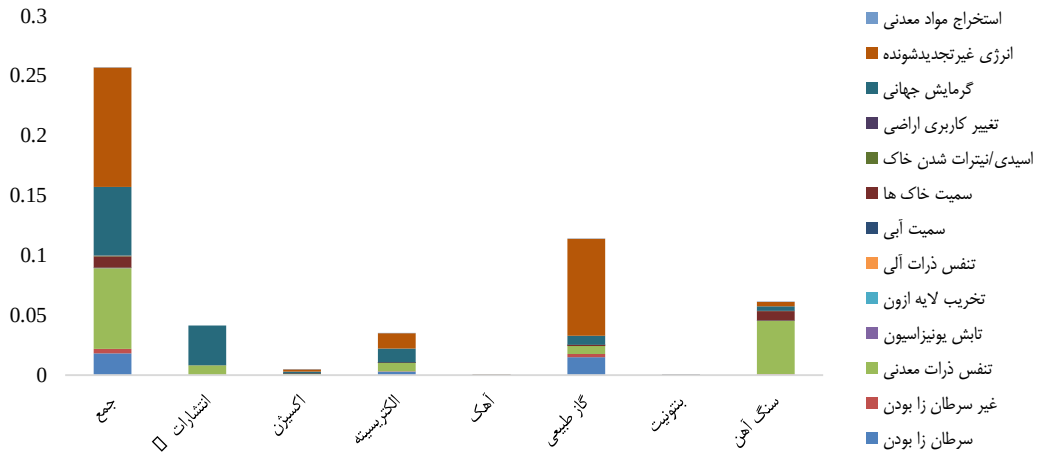
نتایج نشان می‌دهد دو شاخص زیست محیطی «انرژی غیر تجدید شونده و گرمایش جهانی» که در مجموع ۸۰ درصد از کل اثرات زیست محیطی را شامل می‌شود، از عمده شاخص‌های اصلی تأثیرگذار در این فرایند می‌باشد.



شکل ۵. سهم هر یک از نهاده‌های ورودی در شاخص میانی نرمال شده زیست محیطی تولید یک تن آهن اسفنجی

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504]



شکل ۶. سهم هر یک از نهاده‌های ورودی در شاخص میانی نمره منفرد شده زیست محیطی تولید یک تن آهن اسفنجی

به منظور کاهش اثرات زیست محیطی، اولویت دادن به شاخص‌هایی که بیشترین سهم را دارند، معقول به نظر می‌رسد. مقایسه نتایج مطالعه با بررسی و ارزیابی چرخه حیات تولید آهن اسفنجی بر پایه زغال سنگ که توسط Elango انجام شد (۱۲)، حاکی از آن بود که فرایند مبتنی بر گاز دارای مزایایی مانند مصرف انرژی و انتشار کم نسبت به فرایند مبتنی بر زغال سنگ می‌باشد. با این حال، روش مبتنی بر گاز به منابع غنی گاز طبیعی نیاز دارد که از سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید. نگرانی‌های بین‌المللی رو به رشدی در مورد تغییرات آب و هوایی جهانی به ویژه در زمینه انتشار روزافزون گازهای گلخانه‌ای وجود دارد (۱۶، ۱۵). یک راه‌حل امیدوارکننده، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند زیست‌توده به عنوان عامل کاهنده در فرایند تولید آهن برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی است (۱۷). از آن‌جایی که فرایند تولید آهن اسفنجی با Carbothermic boudouard reaction هدایت می‌شود، امکان جایگزینی سوخت‌های فسیلی با زیست توده وجود دارد (۱۸). انتشار کربن حاصل از زیست‌توده همان مقدار کربن ثابت شده از طریق فتوسنتز توسط گیاه است. بنابراین، انتشار خالص کربن حاصل از استفاده از زیست‌توده، هیچ افزودنی به گازهای گلخانه‌ای ندارد. به همین دلیل، زیست‌توده می‌تواند برای پاسخگویی موفقیت‌آمیز به چالش‌های افزایش تقاضا در مصرف انرژی و در عین حال، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنایع متالوژی معرفی شود (۱۸).

جدول ۴. نتایج خروجی از دو نرم‌افزار و مقایسه آن‌ها

گروه تأثیر	واحد	OpenLCA	Simapro	R (بیشینه/ کمینه)
سرطان‌زا بودن	kg C2H3Cl eq	٤٦/٢٣٩٢	٤٦/٢٣٨٩	١/٠٠
غیر سرطان‌زا بودن	kg C2H3Cl eq	٩/٤٠٥٢	٩/٤٠٦١	١/٠٠
تنفس ذرات معدنی	kg PM2.5 eq	٠/٧١٢٩	٠/٧١١٠	١/٠٠
تابش یونیزاسیون	Bq C-14 eq	٢٠٠٧/٣٠١٠	٢٠٠٧/٢٨١٠	١/٠٠
تخریب لایه ازن	kg CFC-11 eq	٨/٥٠٠٠e$^{-٥}$	٨/٥٠٠٠e$^{-٥}$	١/٠٠
تنفس ذرات آلی	kg C2H4 eq	٠/٢٢٨٢	٠/٢٢٨٢	١/٠٠
سمیت آبی	kg TEG water	٩٨٣٠٢/٣٦٠٠	٩٨٣٠٣/١٢٠٠	١/٠٠
سمیت خاک‌ها	kg TEG soil	١٦١٠٨/٣٦٠٠	١٦١٠٥/٣٦٠٠	١/٠٠
اسیدی/ نیترات شدن خاک	kg SO2 eq	١٠/١٣٨٧	١٠/١٣٧٥	١/٠٠
تغییر کاربری اراضی	m2org.arable	١/٥٠٦٢	٢/١٩٩٩	١/٤٦
اسیدی شدن محیط‌های آبی	kg SO2 eq	٢/٢١٤٠	٢/٢١٥٠	١/٠٠
تغذیه‌گرایی محیط‌های آبی	kg PO4 P-lim	٠/٠٢٤٩	٠/٠٢٤٩	١/٠٠
گرمایش جهانی	kg CO2 eq	٥٦٨/٠١٨٩	٥٦٨/١١٢٥	١/٠٠
انرژی غیر تجدید شونده	MJ primary	١٥١٣٩/٤٩٠٠	١٥١٥٤/٧٨٠٠	١/٠٠
استخراج مواد معدنی	MJ surplus	٥٧/٩٢٩٠	٥٨/٠١٢٦	١/٠٠

eq که مخفف Equivalent به معنی معادل می‌باشد؛ یعنی واحد سرطان‌زا بودن برابر است با معادل کیلوگرم C2H3Cl

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504]

Yuan و همکاران امکان استفاده از سه نوع زیست‌توده ارزان مانند زغال بامبو، الیاف کاه و زغال چوب را به جای سوخت فسیلی در تولید آهن اسفنجی در Rotary Hearth Furnace (RHF) بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که الیاف کاه به عنوان یک احیاکننده بهینه در تشکیل آهن اسفنجی در مقایسه با سوخت‌های فسیلی می‌باشد (۱۹). Guo و همکاران از گاز سنتز مشتق شده از زیست‌توده در طی فرایند پیرولیز به عنوان عامل کاهنده‌ای برای احیای مستقیم گلوله‌های اکسید شده سنگ آهن استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که گاز سنتز زیست‌توده‌ای، دارای راندمان کاهش گلوله‌های آهن مشابه با گاز طبیعی بود و نتیجه‌گیری کردند که یک فرایند جدید آهن‌سازی بدون انتشار خالص کربن دی‌اکسید با استفاده از گاز سنتز مشتق شده از زیست‌توده به عنوان عامل کاهنده برای تولید آهن اسفنجی امکان‌پذیر است. کاهش‌پذیری آهن نیز در دمای کاهش ۱۳۲۳ کلوین به ۹۹/۹۵ درصد افزایش یافت (۲۰). Strezov مکانیزم‌های اساسی کاهش سنگ آهن با ضایعات چوب زیست‌توده را بررسی و سنگ آهن را با ضایعات چوب زیست‌توده در نسبت‌های مختلف مخلوط کردند. زمانی که تا ۳۰ درصد وزنی زیست‌توده به مخلوط وارد شد، سنگ آهن با موفقیت به فاز آهن فلزی کاهش یافت (۱۸).

استفاده از چسب‌های طبیعی مانند Beet molasses به جای چسب شیمیایی در تولید گندله، موجب کاهش مصرف گاز در واحد احیای مستقیم می‌شود. با به کارگیری تکنولوژی احیای غیر مستقیم و استفاده از کنستانتره مرغوب و با عیار بالا و مقدار FeO پایین (کمتر از ۱۰ درصد) به نسبت Fe (مجموع)، می‌توان مصرف گاز را در فرایند احیای مستقیم کاهش داد. فرایند تولید گندله بر تنفس ذرات معدنی تأثیرگذار است که با استفاده از سیستم‌های تصفیه داخل مجموعه و ایجاد پوشش مناسب در واحدهای خردایش سنگ آهن و با کنترل غبارات حاصل از خردایش به روش جمع‌آوری در سیکل بسته و تصفیه غبارات به وسیله سیستم‌های نوین بگ فیلتراسیون، می‌توان مقدار زیادی از مشکلات را کاهش داد.

نتیجه‌گیری

تولید آهن اسفنجی از صنایع بسیار پرمصرف است که انتشارات آن تأثیرات مخربی بر گرمایش کره زمین دارد. انجام یک ارزیابی چرخه حیات، به تولیدکنندگان ان امکان شناسایی فرایندهایی که بیشترین آلودگی را دارند، می‌دهد تا برای بهبود روند آن برنامه‌ریزی‌های لازم انجام شود. در پژوهش حاضر، اثرات زیست محیطی تولید آهن اسفنجی به روش Midrex مورد بررسی قرار گرفت که روش تولید عمده کشور بود و اولین مطالعه ارزیابی چرخه زندگی در صنایع تولید آهن اسفنجی ایران نیز محسوب می‌شود. نتایج نشان داد که بیشترین اثرات زیست محیطی حاصل از مواد ورودی به ترتیب شامل گاز طبیعی (۴۴/۳ درصد) و سنگ آهن (۲۳/۹ درصد) بود. نتایج حاصل از فرایندها نیز حاکی از آن بود که ۶۲/۸ درصد اثرات مربوط به فرایند تولید آهن اسفنجی می‌باشد و ۳۷/۲ درصد از کل اثرات را تولید گندله در برمی‌گیرد. دو شاخص زیست محیطی انرژی غیر تجدید شونده و گرمایش جهانی که در مجموع ۸۰ درصد از کل اثرات زیست محیطی را تشکیل می‌دهند، از عمده شاخص‌های اصلی تأثیرگذار در این فرایندها می‌باشند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از تمام افرادی که در انجام پژوهش حاضر همکاری نمودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

References

1. Midrex Technologies. 2019 World Direct Reduction Statistics [Online]. [cited 2020]; Available from: URL: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-STATSbook2019Final.pdf
2. An R, Yu B, Li R, Wei YM. Potential of energy savings and CO2 emission reduction in China's iron and steel industry. Appl Energy 2018; 226: 862-80.
3. Zhang F, Huang K. The role of government in industrial energy conservation in China: Lessons from the iron and steel industry. Energy Sustain Dev 2017; 39: 101-14.
4. de Boer IJM. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. Livest Prod Sci 2003; 80(1): 69-77.
5. Brentrup F, Kusters J, Kuhlmann H, Lammel J. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. Eur J Agron 2004; 20(3): 247-64.
6. Faramarzi B, Motevali A, Hashemi SJ, Nabavi-Pelesaraei A. Evaluation of the environmental impact of industrial and traditional broiler chicken production by using life cycle assessment. Research on Animal Production 2019; 10(26): 64-74. [In Persian].
7. Yilmaz O, Anctil A, Karanfil T. LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting. J Clean Prod 2015; 105: 337-47.
8. Nicholas MJ, Clift R, Azapagic A, Walker FC, Porter DE. Determination of "Best Available Techniques" for integrated pollution prevention and control: A life cycle approach. Process Saf Environ Prot 2000; 78(3): 193-203.
9. Olmez GM, Dilek FB, Karanfil T, Yetis U. The environmental impacts of iron and steel industry: a life cycle assessment study. J Clean Prod 2016; 130: 195-201.
10. Burchart-Korol D. Life cycle assessment of steel production in Poland: A case study. J Clean Prod 2013; 54: 235-43.
11. Li F, Chu M, Tang J, Liu Z, Wang J, Li S. Life-cycle assessment of the coal gasification-shaft furnace-electric

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504]

furnace steel production process. J Clean Prod 2021; 287: 125075.
12. Elango S. Life cycle assessment of coal based direct-reduced iron production in India [MSc Thesis]. Stockholm, Sweden: KTH School of Industrial Engineering and Management; 2020.
13. International Organization for Standardization. ISO 14040: 2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, 2nd ed [Online]. [cited 2006 July]; Available from: URL: https://www.iso.org/standard/37456.html
14. Jolliet O, Margni M, Charles Rl, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, et al. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. Int J LCA 2003; 8(6): 324-30.
15. Norgate T, Haque N, Somerville M, Jahanshahi S. Biomass as a source of renewable carbon for iron and steelmaking. ISIJ Int 2012; 52(8): 1472-81.
16. Zhu L, Huo S, Qin L. A microalgae-based biodiesel refinery: Sustainability concerns and challenges. Int J Green Energy 2015; 12(6): 595-602.
17. Abd Rashid RZ, Salleh H, Ani MH, Yunus NA, Akiyama T, Purwanto H. Reduction of low grade iron ore pellet using palm kernel shell. Renew Energy 2014; 63: 617-23.
18. Strezov V. Iron ore reduction using sawdust: Experimental analysis and kinetic modelling. Renew Energy 2006; 31(12): 1892-905.
19. Yuan P, Shen B, Duan D, Adwek G, Mei X, Lu F. Study on the formation of direct reduced iron by using biomass as reductants of carbon containing pellets in RHF process. Energy 2017; 141: 472-82.
20. Guo D, Zhu L, Guo S, Cui B, Luo S, Laghari M, et al. Direct reduction of oxidized iron ore pellets using biomass syngas as the reducer. Fuel Process Technol 2016; 148: 276-81.

[Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]

[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504]

[DOI: 10.48305/jhsr.v19i3.1504] [Downloaded from hsr.mui.ac.ir on 2026-11-14]