

Life Cycle Assessment of Steel Production and Its Environmental Impacts

Maziar Ramezani-Mooziraji¹, Mohammadreza Sabour², Ghorbanali Dezvareh³, Majid Ehteshami²

Original Article

Abstract

Background: Despite its significant impact on the global economy, the iron and steel industry is also the largest consumer of energy and leaves behind a significant environmental footprint. Iran is also one of the top 10 steel producing countries, with more than 77% of its steel being produced in electric arc furnaces (EAFs). Therefore, a proper environmental assessment should be done to minimize the negative effects on the environment. The purpose of this study was to evaluate the life cycle of steel production using EAF method in Iran. This study identifies the major processes and inputs that affect the environmental impact of steel production and proposes effective methods to prevent pollution.

Methods: In this study, SimaPro software with ecoinvent database and IMPACT 2002+ evaluation method were used. Life cycle inventory data were obtained from the average performance of factories in one year and the functional unit was considered to be one ton of rolled steel (coil).

Findings: Among different categories of environmental impacts, non-renewable energy, global warming, and inhalation of mineral particles had the most significant threat, respectively, so that these three categories included 86.5% of the total environmental impact. Among several processes, the greatest effects were related to EAFs (35%), followed by sponge iron production (28.9%) and pellet production (17.1%) in second and third places, respectively. The highest environmental impacts of input materials included electricity (33.8%) and gas consumption (25.8%), respectively.

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

Keywords: Electric arc furnace; Environmental impacts; Iron; Steel; Life cycle stages

Citation: Ramezani-Mooziraji M, Sabour M, Dezvareh G, Ehteshami M. Life Cycle Assessment of Steel Production and Its Environmental Impacts. J Health Syst Res 2023; 19(1): 85-94.

1- Department of Environment, School of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Environment, School of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3- 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

ارزیابی چرخه حیات تولید فولاد و اثرات زیست محیطی آن

مازیار رضانی موزیرجی^۱، محمدرضا صبور^۲، قربانعلی دزواره^۳، مجید احتشامی^۲

مقاله پژوهشی

چکیده

مقدمه: صنعت آهن و فولاد با وجود تأثیر بسزایی که بر اقتصاد جهانی دارند، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی نیز محسوب می‌شوند و تولید گاز گلخانه‌ای فراوانی نیز به همراه دارند. ایران یکی از ۱۰ کشور اول تولیدکننده فولاد می‌باشد که بیش از ۷۷ درصد آن در کوره‌های قوس الکتریکی (EAFs یا Electric arc furnaces) تولید می‌شود. بنابراین، باید ارزیابی زیست محیطی درستی انجام گردد تا کمترین اثرات منفی را بر محیط زیست داشته باشد. هدف از انجام پژوهش حاضر، ارزیابی چرخه حیات تولید فولاد با روش EAF در ایران بود. این مطالعه عمده فرایندها و ورودی‌های تأثیرگذار بر اثرات زیست محیطی تولید فولاد را مشخص و روش‌های مؤثر برای جلوگیری از آلودگی را پیشنهاد کرد.

روش‌ها: در این مطالعه، از نرم‌افزار SimaPro 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 فولاد فولادنورد شده (کلاف) در نظر گرفته شد.

یافته‌ها: در میان اثرات زیست محیطی انرژی غیر تجدید شونده، گرمایش جهانی و تنفس ذرات معدنی به ترتیب بیشترین اثرات را داشتند؛ به طوری که این سه دسته، تأثیر ۸۶/۵ درصدی از کل اثرات زیست محیطی را شامل می‌شدند. در میان فرایندها، بیشترین اثرات مربوط به EAF (۳۵/۰ درصد) بود و فرایندهای تولید آهن اسفنجی و تولید گندله با سهم بودن ۲۸/۹ و ۱۷/۱ درصد به ترتیب جایگاه‌های دوم و سوم را به خود اختصاص دادند. بیشترین اثرات زیست محیطی حاصل از مواد ورودی نیز به ترتیب شامل برق مصرفی (۳۳/۸ درصد) و مصرف گاز (۲۵/۸ درصد) بود.

نتیجه‌گیری: با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در صنایع آهن و فولاد در دهه‌های اخیر، با این حال این صنایع هنوز مصرف انرژی و انتشارات کربن دی‌اکسید زیادی دارند. انجام یک ارزیابی چرخه حیات به تولیدکنندگان فولاد، امکان شناسایی فرایندهای تولیدکننده بیشترین آلودگی را می‌دهد تا برای بهبود آن برنامه‌ریزی‌های لازم انجام شود.

واژه‌های کلیدی: کوره قوس الکتریکی؛ اثرات زیست محیطی؛ آهن؛ فولاد؛ مراحل چرخه حیات

ارجاع: رضانی موزیرجی مازیار، صبور محمدرضا، دزواره قربانعلی، احتشامی مجید. **ارزیابی چرخه حیات تولید فولاد و اثرات زیست محیطی آن**. مجله تحقیقات نظام سلامت ۱۴۰۲؛ ۱۹ (۱): ۸۵-۹۴

تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۱/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴

مقدمه

با وجود تأثیر بسزایی که صنعت آهن و فولاد بر اقتصاد جهانی دارد، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی نیز محسوب می‌شود و تولید آن با انتشار میزان قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای همراه است (۱، ۲). ایران نیز یکی از کشورهای تولیدکننده فولاد می‌باشد که در سال ۲۰۱۹ به تولید ۲۵/۶ میلیون تن دست یافت و این میزان در سال ۲۰۲۰ با رشد ۱۳/۱۴ درصدی، به ۲۹/۰۳ میلیون تن افزایش پیدا کرد و طبق رده‌بندی انجمن فولاد جهانی، در جایگاه دهم تولید در سال ۲۰۲۰ قرار گرفت (۳).

در ایران بیش از ۷۷ درصد از فولاد تولیدی در کوره‌های قوس الکتریکی (EAFs یا Electric arc furnaces) تولید می‌شود. در روش EAF، آهن قراضه و آهن اسفنجی به عنوان ماده اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد و آهن اسفنجی نیز با استفاده از فرایند احیای مستقیم تولید می‌شود. فرایندهای احیای

مستقیم بر اساس نوع احیاکننده، به دو گروه بر پایه زغال‌سنگ و بر پایه گاز تقسیم می‌گردد. 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 و 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 که ۲۷/۸۱ میلیون تن آن بر پایه زغال‌سنگ بود، در جایگاه دوم قرار گرفت (۴).

صنعت آهن و فولاد ایران حدود ۴۵ درصد از کل مصرف انرژی در بخش تولید را به خود اختصاص می‌دهد و 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 (۵). بر این اساس، یکی از

۱- کارشناس ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

نویسنده مسؤول: مازیار رضانی موزیرجی؛ کارشناس ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

Email: maziar.ramezani.mooziraji@gmail.com

می‌باشد. آن‌ها دریافتند که فرایند Direct Reduction Iron-EAF (DRI-EAF) می‌تواند انتشار CO_2 را نسبت به فرایند BF-BOF ۴۰ درصد کاهش دهد، اما از لحاظ مصرف انرژی، اختلاف چندانی در مقایسه با فرایند BF-BOF مشاهده نشد و هزینه آن به دلیل قیمت بالای گاز طبیعی در چین، ۳۴ درصد بیشتر از فرایند BF-BOF بود (۱۵).

Li و همکاران اثرات زیست محیطی فرایند Coal gasification-Shaft furnace-Electric furnace را بر اساس منابع چین (غنی از زغال سنگ، اما نه نفت و گاز طبیعی) با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات مورد بررسی قرار دادند و در کنار آن روش سنتی ساخت فولاد BF-BOF را نیز بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که تأثیرات زیست محیطی فرایند CSE در مقایسه با فرایند BF-BOF از نظر انتشار کربن و مصرف انرژی می‌تواند ۵۸/۱ و ۶۰/۶ درصد کاهش یابد (۱۶).

در بیشتر تحقیقات از داده‌های موجود خاص همان کشور استفاده شده است. بنابراین، نتایج گزارش شده تا حدودی اختصاص به کشور و منطقه مورد بررسی دارد و در واقع، انجام یک پژوهش ارزیابی چرخه حیات مختص کشور برای دستیابی به نتایج واقعی که نمایانگر شرایط موجود کشور باشد، از اهمیت حیاتی برخوردار است. در ایران به عنوان یکی از کشورهای پیشرو در تولید فولاد جهان، مفهوم ارزیابی چرخه حیات روز به روز مورد توجه بیشتر صنعت فولاد ایران قرار گرفته است. با این حال، هیچ مطالعه ارزیابی چرخه حیات جامعی در مورد صنعت آهن و فولاد در ایران انجام نشده است. بنابراین، هدف از انجام پژوهش حاضر، انجام بررسی خاص ارزیابی چرخه حیات برای صنعت فولاد در ایران و درک تأثیرات زیست محیطی مرتبط با تمام مراحل فرایندهای تولید فولاد و محصول نهایی به طور هم‌زمان با استفاده از نرم‌افزار SimaPro نسخه 9.0.0.48 بود. انتظار می‌رود یافته‌های تحقیق حاضر به تعیین بهترین فرصت‌ها برای کاهش تأثیرات آینده در تولید زنجیره فولاد بینجامد و در قالب یک پژوهش موردی و واقعی مورد توجه خوانندگان قرار گیرد.

روش‌ها

بر اساس استاندارد ISO 14040، روش ارزیابی چرخه حیات از چهار بخش تشکیل شده است.

بیان دامنه و هدف: در این مرحله 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 گردد و باید با کاربرد مورد نظر مطالعه سازگار باشد. تعریف هدف و دامنه کاربرد، باعث حرکت در مسیر صحیح کل فرایند و دستیابی به معنی‌دارترین نتایج می‌شود.

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، به عنوان قلب روش ارزیابی چرخه حیات در نظر گرفته می‌شود. در این گام از ارزیابی چرخه حیات، عملیات جمع‌آوری صحیح و دقیق داده‌ها انجام می‌شود.

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

روش‌های جامع بررسی اثرات زیست محیطی، روش ارزیابی چرخه حیات می‌باشد 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 می‌باشد) به طور کامل و هم‌زمان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (۷، ۶). 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 ازون، پتانسیل گرم شدن زمین، سمیت برای انسان و...) طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین، ارزیابی چرخه حیات را می‌توان به منظور مقایسه تأثیرات زیست محیطی محصولات مختلف استفاده کرد و با آن را برای مقایسه فرایندهای مختلف تولید به کار برد. بنابراین، ارزیابی چرخه حیات جهت تعیین نقاط بحرانی اثرات زیست محیطی (مراحل) 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، ۹). به سبب اثرات زیست محیطی بالای کارخانه آهن و فولاد، پژوهش‌های فراوانی در این راستا و در زمینه ارزیابی چرخه حیات آن انجام شده است.

Tongpool و همکاران در یک مطالعه جامع، اثرات نسبی محصولات مختلف فولادی (دال، نورد گرم، نورد سرد، گالوانیزه گرم، فولادهای الکتروگالوانیزه) را در گروه‌های تأثیر سوخت‌های فسیلی، پتانسیل گرمایش جهان، میزان سمیت برای اکوسیستم، مواد سرطان‌زا و مواد آلی محرک تنفسی بررسی کردند و دریافتند که در بین محصولات مختلف فولادی، فولاد گالوانیزه گرم دارای بیشترین تأثیرات زیست محیطی است (۱۰). Olmez و همکاران ارزیابی چرخه حیات تولید آهن و فولاد در ترکیه را با هدف مقایسه تأثیر فرایندهای مختلف و محصولات نهایی هم‌زمان انجام دادند که در میان فرایندها، فرایند ساخت فولاد بالاترین تأثیر کل زیست محیطی و در میان محصولات نیز کلاف نورد گرم، بیشترین تأثیر زیست محیطی را به همراه داشت. همچنین، بزرگ‌ترین پیامد زیست محیطی مربوط به تنفس ذرات معدنی و گرمایش جهانی بود (۱۱). تحقیقات متعددی در رابطه با ارزیابی تأثیرات زیست محیطی ساخت فولاد با استفاده از فرایند EAF وجود دارد. Burchart-Korol در پژوهش خود، تولید فولاد از طریق تولید یکپارچه و مسیرهای EAF بر پایه آهن قراضه را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه دست یافت که در فرایند EAF، مصرف برق تأثیر عمده‌ای در کاهش مجموع سوخت‌های فسیلی مصرفی و انتشار گازهای گلخانه‌ای فرایند داشت. همچنین، نتایج مطالعه وی نشان داد که فرایند EAF نسبت به فرایند سنتی Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace (BF-BOF)، تأثیرات زیست محیطی کمتری دارد (۱۲).

سه نوع فرایند تولید نیکل از جمله فرایند EAF توسط Wang و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها بیان کردند که مصرف برق موجب بیشترین بار محیطی در فرایند EAF می‌شود و با این حال، فرایند EAF دارای کمترین میزان تأثیرات زیست محیطی است (۱۳). Lin و همکاران جریان مواد و انرژی در یک صنعت فولادسازی با فرایند EAF را از دیدگاه چرخه زندگی ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که فرایند EAF با مصرف مقدار قابل توجهی از مواد و انرژی همراه است که باعث تأثیرات زیست محیطی مخربی از جمله سمیت برای انسان و فرسایش آب شیرین می‌شود (۱۴). Chen و همکاران نیز به ارزیابی کوره شافت-EAF پرداختند که بر اساس اصلاح خشک CO_2eCH_4

داده‌ها با استفاده از یک مطالعه میدانی از میانگین عملکرد کارخانه‌های فولاد خوزستان و فولاد نطنز در این یک سال تهیه گردید. این کارخانجات به عنوان نماینده صنعت فولاد ایران از نظر فن‌آوری انتخاب شدند. فاضلاب هر فرایند به تصفیه‌خانه ارسال می‌شود و پس از تصفیه، برای آبیاری فضای سبز کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. آهن سرباره نیز جدا و برای ذوب مجدد استفاده می‌شود و بقیه سرباره برای ساخت بتن به خارج از کارخانه انتقال می‌یابد. غبار تولیدی نیز برای استفاده در صنایع تولید کنسانتره و گندله‌سازی به خارج از کارخانه ارسال می‌گردد. از قراضه تولیدی در طول فرایند تولید نیز مجدد در کوره ذوب استفاده می‌شود. مراحل ساخت کارخانه و مراحل استفاده و پایان عمر از ارزیابی چرخه حیات حذف شد. مقادیر 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.

روش ارزیابی چرخه حیات

ارزیابی چرخه حیات تولید آهن اسفنجی و تولید فولاد با استفاده از SimaPro با پایگاه داده Ecoinvent انجام شد. مطابق با ISO 14042، ارزیابی چرخه حیات را می‌توان با استفاده از چهار مرحله «طبقه‌بندی تأثیر، شناسایی، نرمال‌سازی و وزن‌دهی» انجام داد که دو مرحله اول اجباری و بقیه اختیاری می‌باشد (۱۷).

در پژوهش حاضر، روش IMPACT2002+ 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 اوزون و...) می‌باشد که در نهایت، در قالب چهار شاخص نهایی «سلامتی انسان‌ها، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیم و منابع» قرار می‌گیرد (۱۸).

دسته‌های اثر مغذی شدن محیط‌های آبی و اسیدی شدن محیط‌های آبی در نرم‌افزار SimaPro در دست توسعه است. بنابراین، اثرات بر روی این دسته آسیب‌ها محاسبه نمی‌شود. ضریب وزن ۱ به عنوان مقدار پیش‌فرض همان‌گونه که توسط IMPACT2002+ پیشنهاد شده است (۱۹)، استفاده گردید.

یک سیستم به واسطه چرخه حیات آن محصول می‌باشد.

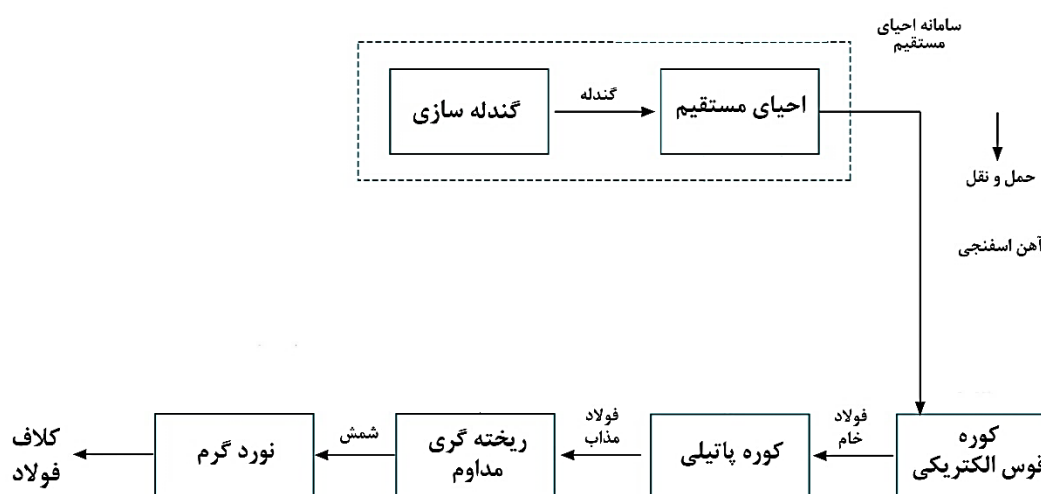
تفسیر نتایج: آخرین بخش از مطالعه ارزیابی چرخه حیات است که در آن نتایج به دست آمده به صورت ترکیبی، منابع بحرانی پیامدها و گزینه‌هایی برای کاهش آن‌ها ارائه می‌دهد (۱۴).

تعیین دامنه و هدف

هدف مطالعه حاضر، بررسی اثرات زیست محیطی تولید آهن اسفنجی با استفاده از گاز طبیعی و تولید فولاد در EAFs با استفاده از آهن اسفنجی و قراضه و مقایسه تأثیرات مرتبط با فرایندهای مختلف تولید می‌باشد. بیش از ۷۷ درصد از تولید فولاد در ایران با استفاده از EAFs صورت می‌گیرد و بیشتر آن‌ها از آهن اسفنجی و قراضه به نسبت ۹۰ به ۱۰ در کوره‌ها به عنوان ورودی اصلی استفاده می‌کنند. نمونه مورد بررسی، کارخانه فولاد نطنز، واقع در استان اصفهان، شهرستان نطنز، شهرک صنعتی نطنز با تناژ تولیدی سالانه ۱ میلیون تن بود که از آهن اسفنجی و آهن قراضه به نسبت ۹۰ به ۱۰ استفاده می‌کند. آهن اسفنجی این کارخانه از کارخانه فولاد خوزستان واقع در استان خوزستان، اهواز، کیلومتر ۱۰ جاده بندر امام خمینی تهیه می‌شود که از عمده تولیدکنندگان آهن اسفنجی در کشور می‌باشد و از روش میدرکس 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 تحقیق حاضر بر پایه جرم می‌باشد و به صورت یک تن فولاد نورد شده انتخاب و همچنین، یک تن از محصول هر فرایند نیز آورده شده است. مرز سامانه مورد بررسی شامل فرایندهای «تولید گندله، تولید آهن اسفنجی، EAF، کوره پاتیلی، ریخته‌گری مداوم و نورد گرم» می‌باشد. شکل ۱ مرز سیستم با نمودار جریان فرایند تولید فولاد و ورودی و خروجی‌های مربوط طی هر مرحله از فرایند را نشان می‌دهد.

موجودی داده

این بخش یکی از مهم‌ترین مراحل بررسی ارزیابی چرخه حیات می‌باشد؛ چرا که استفاده از داده‌های قدیمی و منسوخ، منجر به نتیجه‌گیری نادرست می‌شود. بنابراین، در پژوهش حاضر، سال ۲۰۲۰ به عنوان سال مرجع انتخاب و



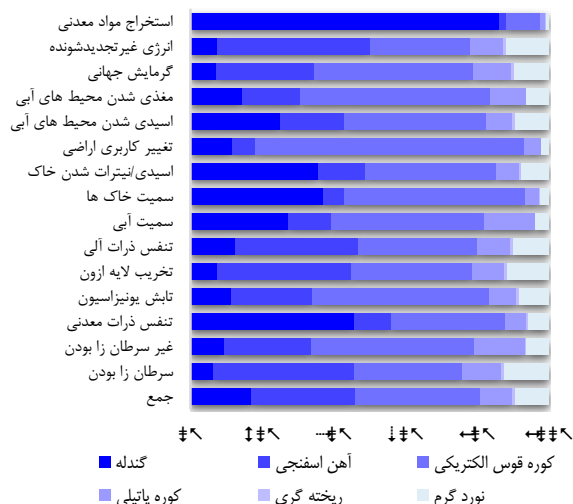
شکل ۱. مرز سامانه تولید فولاد به روش (EAF) Electric arc furnace

جدول ۱. ورودی و خروجی‌های تولید یک تن فولاد نورد شده به روش Electric arc furnace (EAF)

ورودی‌ها و خروجی‌ها	واحد	گندله	آهن اسفنجی	EAF	کوره پاتیلی	ریخته‌گری مداوم	نورد گرم
ورودی‌ها							
آهک	کیلوگرم	۷/۲۰	۰/۵	-	-	-	-
سنگ آهن	تن	۱/۰۲	-	-	-	-	-
بنتونیت	کیلوگرم	۵/۷۴	-	-	-	-	-
گاز طبیعی	مترمکعب	۱۶/۹۵	۲۶۰/۰۰	-	۳۵/۰۰	۱/۰۳	۵۱/۲۰
الکتریسیته	کیلووات ساعت	۳۹/۰۰	۱۰۷/۰۰	۴۹۰/۳۸	۸۷/۷۵	۱۷/۳۰	۱۵۲/۷۰
آب خنک‌سازی	مترمکعب	۰/۱۲	۱/۴۰	۰/۹۶	۰/۲۴	۰/۸۰	۰/۵۰
اکسیژن	کیلوگرم	-	۲۲/۰۰	۱۲/۸۷	-	-	-
گندله	تن	-	۱/۴۰	-	-	-	-
فرومگنیز	کیلوگرم	-	-	۰/۱۵	۰/۱۵	-	-
فروسیلیس	کیلوگرم	-	-	۱/۲۰	۰/۹۴	-	-
آهن قراضه	تن	-	-	۰/۱۰	-	-	-
دولومیت	کیلوگرم	-	-	۴/۱۷	-	-	-
آهک خام	کیلوگرم	-	-	۹۱/۷۶	۰/۰۵	-	-
الکتروود	کیلوگرم	-	-	۱۱/۲۰	۴/۸۹	-	-
کک نفتی	کیلوگرم	-	-	۰/۱۴	۰/۰۸	-	-
حمل و نقل	کیلومتر	-	-	۶۵۰/۰۰	-	-	-
آلومینیوم	کیلوگرم	-	-	۰/۱۷	۰/۰۱	-	-
مواد نسوز	کیلوگرم	-	-	۲۷/۳۰	۱۱/۳۰	-	-
آهن اسفنجی	تن	-	-	۱/۰۲	-	-	-
فولاد مذاب خام	تن	-	-	-	۱/۰۶	-	-
کلسیم کاربید	کیلوگرم	-	-	-	۰/۰۹	-	-
نیتروژن	کیلوگرم	-	-	-	۰/۸۴	-	-
آرگون	کیلوگرم	-	-	-	۰/۹۴	-	-
فولاد مذاب	تن	-	-	-	-	۱/۰۲	-
شمش	تن	-	-	-	-	-	۱/۰۲
خروجی‌ها							
گندله	تن	۱/۰۰	-	-	-	-	-
آهن اسفنجی	تن	-	۱/۰۰	-	-	-	-
فولاد مذاب خام	تن	-	-	۱	-	-	-
فولاد مذاب	تن	-	-	-	۱	-	-
شمش	تن	-	-	-	-	۱/۰۰	-
کلاف فولادی	تن	-	-	-	-	-	۱/۰۰
انتشارات							
کربن دی‌اکسید	کیلوگرم	۲۴/۳۵	۲۹۳/۰۰	۱۴۳/۶۰	۸۸/۱۸	-	۵۷/۸۰
کربن مونوکسید	کیلوگرم	۰/۲۰	۱/۱۶	۳/۸۲	۰/۶۸	-	۰/۰۱
سولفور دی‌اکسید	کیلوگرم	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۱	-	۰/۰۳
نیتروژن دی‌اکسید	کیلوگرم	۰/۳۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱	-	۰/۰۳
گرد و غبار	کیلوگرم	۳/۴۰	۱/۱۴	۵/۳۰	۰/۵۰	۰/۰۱	۰/۰۲
فاصلاب	مترمکعب	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۵

EAF: Electric arc furnace

عمده دلیل آن مصرف سنگ آهن (۷۸/۰ درصد) و تأثیرات حاصل از انتشارات خروجی و مصرف برق به ترتیب با ۸/۵ و ۷/۴ درصد بود.



شکل ۲. سهم هر یک از فرایندها در شاخص میانی زیست محیطی تولید یک تن فولاد نورد شده

کل تأثیرات فرایند EAF، $۰/۲۲۳ \text{ pt}$ به دست آمد که $۰/۰۸۳ \text{ pt}$ آن مربوط به گرمایش جهانی می باشد و تأثیرات مربوط به انرژی غیر تجدید شونده و تنفس ذرات معدنی نیز به ترتیب با $۰/۰۶۲۱ \text{ pt}$ و $۰/۰۴۴۷ \text{ pt}$ در جایگاه های دوم و سوم قرار گرفتند؛ به طوری که این سه دسته در مجموع ۸۵/۱ درصد از کل تأثیرات این فرایند را شامل شد.

یافته ها

نتایج ارزیابی زیست محیطی یک تن فولاد نورد شده با توجه به سهم هر فرایند در جدول ۲ و شکل ۲ آورده شده است. نتایج نرمال شده نیز در جدول ۳ و شکل ۳ و نتایج نمره منفرد شده در شکل ۴ ارائه گردید. برای بررسی اثرات هر فرایند در تولید یک تن محصول، ورودی حاصل از فرایند قبلی در نظر گرفته نشد؛ به این صورت که فرایند تولید آهن اسفنجی بدون ورودی گندله و به همین صورت برای فرایندهای دیگر است.

بیشترین اثرات زیست محیطی حاصل از مواد ورودی برای تولید یک تن فولاد نورد شده در شکل ۵ ارائه شده است. در شکل های ۶ و ۷ نیز نتایج نرمال شده و نمره منفرد مربوط به تولید یک تن فولاد نورد شده با توجه به مواد ورودی نشان شده است.

بحث

بر اساس نتایج به دست آمده، میزان کل اثرات زیست محیطی، $۰/۶۳۸۰ \text{ pt}$ گزارش گردید که $۰/۲۲۳۰ \text{ pt}$ آن مربوط به انرژی غیر تجدید شونده بود و $۰/۱۸۷۰ \text{ pt}$ نیز به گرمایش جهانی اختصاص دارد و تنفس ذرات معدنی هم $۰/۱۴۱۰ \text{ pt}$ را به خود اختصاص داده است و این سه دسته تأثیر در مجموع ۸۶/۵ درصد از کل تأثیرات زیست محیطی را شامل شد.

بر اساس شکل ۲، در طی تولید یک تن محصول، ۳۵ درصد اثرات مربوط به فرایند EAF می باشد که عمده دلیل آن مصرف برق (۵۲/۷ درصد) بوده است و در مراحل بعدی به دلیل حمل و نقل (۱۱/۷ درصد) و انتشارات مستقیم (۹/۸ درصد) می باشد. فرایند تولید آهن اسفنجی با سهم بودن ۲۸/۹ درصد از کل اثرات، در رتبه بعدی قرار گرفت که به دلیل مصرف زیاد گاز (۶۳/۸ درصد)، انتشارات خروجی از این فرایند، ۱۸/۹ درصد و مصرف برق، ۱۴/۲ درصد گزارش گردید. ۱۷/۱ درصد از کل اثرات را تولید گندله سازی به خود اختصاص داد که

جدول ۲. نتایج ارزیابی بر اساس سهم هر فرایند چرخه حیات تولید یک تن فولاد نورد شده

گروه تأثیر	واحد	گندله	آهن اسفنجی	EAF	کوره پاتیلی	ریخته گری	نورد گرم	جمع
سرطانزا بودن	kg C2H3Cl eq	۷/۰۷	۴۵/۰۰	۳۴/۱۰	۱۲/۴۰	۰/۹۷۳	۱۴/۱۰۰	۱۱۴/۰۰
غیر سرطانزا بودن	kg C2H3Cl eq	۲/۹۶	۷/۶۳	۱۴/۲۰	۴/۴۵	۱/۱۰۸	۱/۹۳۰	۳۱/۳۰
تنفس ذرات معدنی	kg PM2.5 eq	۰/۶۵	۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۸۲	۱/۴۳
تابش یونیزاسیون	Bq C-14 eq	۷۵۴/۰۰	۱/۵۱e ^۳	۳/۲۶e ^۳	۵۰۲/۰۰	۵۸/۴۰۰	۵۳۷/۰۰	۶/۶۲e ^۳
تخریب لایه اوزون	kg CFC-11 eq	۱/۵۶e ^{-۵}	۸/۰۲e ^{-۵}	۷/۱۹e ^{-۵}	۱/۸۸e ^{-۵}	۱/۷۲۰e ^{-۶}	۲/۴۷۰e ^{-۵}	۲/۱۳e ^{-۴}
تنفس ذرات آلی	kg C2H4 eq	۰/۰۷	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۵۵	۰/۵۵
سمیت آبی	kg TEG water	۷/۶۸e ^۴	۳/۳۹e ^۴	۱/۱۹e ^۵	۳/۹۸e ^۴	۶۹۷/۰۰۰	۱/۰۲۰e ^۴	۲/۸۱e ^۵
سمیت خاکها	kg TEG soil	۱/۵۶e ^۴	۲/۵۷e ^۳	۲/۱۳e ^۴	۱/۶۱e ^۳	۹۰/۲۰۰	۱/۰۳۰e ^۳	۴/۲۲e ^۴
اسیدی/نیترات شدن خاک	kg SO2 eq	۸/۳۷	۳/۰۵	۸/۵۸	۱/۴۷	۰/۱۶۴	۱/۷۸۰	۲۳/۴۰
تغییر کاربری اراضی	m2org.arable	۱/۰۸	۰/۶۱	۶/۹۷	۰/۴۲	۰/۰۱۸	۰/۱۸۴	۹/۲۹
اسیدی شدن محیط های آبی	kg SO2 eq	۱/۴۶	۱/۰۳	۲/۳۰	۰/۴۳	۰/۰۵۱	۰/۵۳۷	۵/۸۱
مغذی شدن محیط های آبی	kg PO4 P-lim	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۹	۵/۷۳۰e ^{-۴}	۰/۰۰۶	۵/۸۱
گرمایش جهانی	kg CO2 eq	۱۳۳/۰۰	۵۰۷/۰۰	۸۲۵/۰۰	۱۹۸/۰۰	۱۲/۸۰۰	۱۷۹/۰۰۰	۱/۸۰e ^۳
انرژی غیر تجدید شونده	MJ primary	۲/۵۴e ^۳	۱/۴۵e ^۴	۹/۴۴e ^۳	۳/۱۳e ^۳	۲۵۹/۰۰۰	۴/۰۷۰e ^۳	۳/۳۹e ^۴
استخراج مواد معدنی	MJ surplus	۶۳/۹۰	۱/۳۱	۷/۱۹	۱/۰۹	۰/۰۴۷	۰/۵۲۶	۷۴/۱۰

EAF: Electric arc furnace

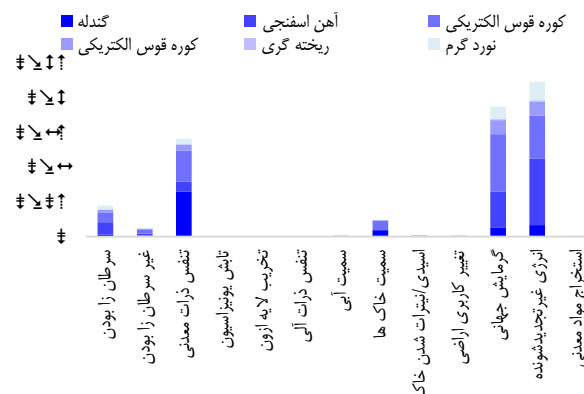
جدول ۳. نتایج ارزیابی نرمال شده بر اساس سهم هر فرایند چرخه حیات تولید یک تن فولاد نورد شده

گروه تأثیر	واحد	گندله	آهن اسفنجی	EAF	کوره پاتیلی	ریخته‌گری	نورد گرم	جمع
سرطان‌زا بودن	Pt	۰/۰۰۲۸	۰/۰۱۷۸	۰/۰۱۳۵	۰/۰۰۴۹	$3/84e^{-5}$	۰/۰۰۵۶	۰/۰۴۴۹
غیر سرطان‌زا بودن	Pt	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۱۷	$4/28e^{-5}$	$7/6200e^{-5}$	۰/۰۱۲۴
تنفس ذرات معدنی	Pt	۰/۰۶۴۶	۰/۰۱۴۷	۰/۰۴۴۷	۰/۰۰۸۵	$7/7e^{-5}$	۰/۰۰۸۱	۰/۱۴۱۰
تابش یونیزاسیون	Pt	$2/2300e^{-5}$	$4/4600e^{-5}$	$9/6600e^{-5}$	$1/4900e^{-5}$	$1/73e^{-6}$	$1/5900e^{-5}$	$1/9600e^{-5}$
تخریب لایه ازون	Pt	$2/3000e^{-6}$	$1/1900e^{-5}$	$1/6000e^{-5}$	$2/7900e^{-6}$	$2/55e^{-7}$	$3/6600e^{-6}$	$3/1000e^{-5}$
تنفس ذرات آلی	Pt	$2/0700e^{-5}$	$5/6500e^{-5}$	$5/4500e^{-5}$	$1/5600e^{-5}$	$1/08e^{-6}$	$1/6500e^{-5}$	$1/6500e^{-5}$
سمیت آبی	Pt	$2/8100e^{-5}$	$1/2400e^{-5}$	$4/3700e^{-5}$	$1/4600e^{-5}$	$2/55e^{-6}$	$3/7300e^{-5}$	۰/۰۰۱۰
سمیت خاک‌ها	Pt	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۲۳	$9/8200e^{-5}$	$5/21e^{-5}$	$5/9600e^{-5}$	۰/۰۲۴۳
اسیدی/نیترات شدن خاک	Pt	$6/3500e^{-5}$	$2/3200e^{-5}$	$6/5100e^{-5}$	$1/1200e^{-5}$	$1/24e^{-5}$	$1/3500e^{-5}$	۰/۰۰۱۷
تغییر کاربری اراضی	Pt	$8/6200e^{-5}$	$4/8700e^{-5}$	$5/5500e^{-5}$	$3/3000e^{-5}$	$1/4e^{-6}$	$1/4600e^{-5}$	۰/۰۰۰۷
گرمایش جهانی	Pt	۰/۰۱۳۴	۰/۰۵۱۲	۰/۰۸۳۳	۰/۰۲۰۰	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۸۱	۰/۰۱۸۷
انرژی غیر تجدید شونده	Pt	۰/۰۱۶۷	۰/۰۹۵۴	۰/۰۶۲۱	۰/۰۲۰۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲۶۸	۰/۰۲۲۳
استخراج مواد معدنی	Pt	$4/2100e^{-5}$	$8/5900e^{-6}$	$4/7300e^{-5}$	$7/1800e^{-6}$	$3/11e^{-7}$	$3/4600e^{-6}$	$4/8700e^{-5}$
جمع	Pt	۰/۱۰۹۰	۰/۱۸۴۰	۰/۲۲۳۰	۰/۰۵۷۰	۰/۰۰۴۳	۰/۰۶۰۰	۰/۶۳۸۰

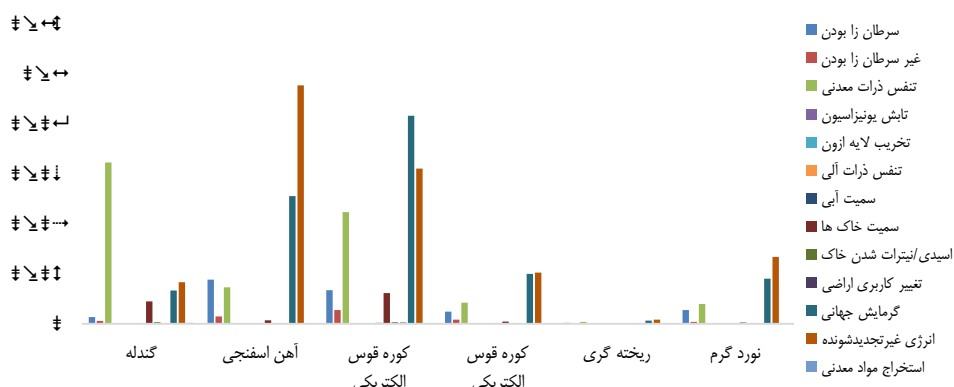
EAF: Electric arc furnace; Pt: Point

کل تأثیرات در فرایند تولید آهن اسفنجی، pt ۰/۱۸۴ به دست آمد که بیشتر از نصف آن (۵۱/۸ درصد، pt ۰/۰۹۵۱) مربوط به انرژی غیر تجدید شونده بود. تأثیرات مربوط به گرمایش جهانی نیز با pt ۰/۰۵۱ در جایگاه بعدی قرار گرفت. همچنین، فرایند تولید گندله، pt ۰/۰۰۹ از تأثیرات کل را به خود اختصاص داد که حدود ۶۰ درصد آن (pt ۰/۰۶۴) شامل تنفس ذرات معدنی بود. بر اساس داده‌های شکل ۵، بیشترین اثرات زیست محیطی حاصل از مواد ورودی برای تولید یک تن فولاد نورد شده به ترتیب شامل برق مصرفی، مصرف گاز، اثرات انتشارات مستقیم و سنگ آهن می‌باشد.

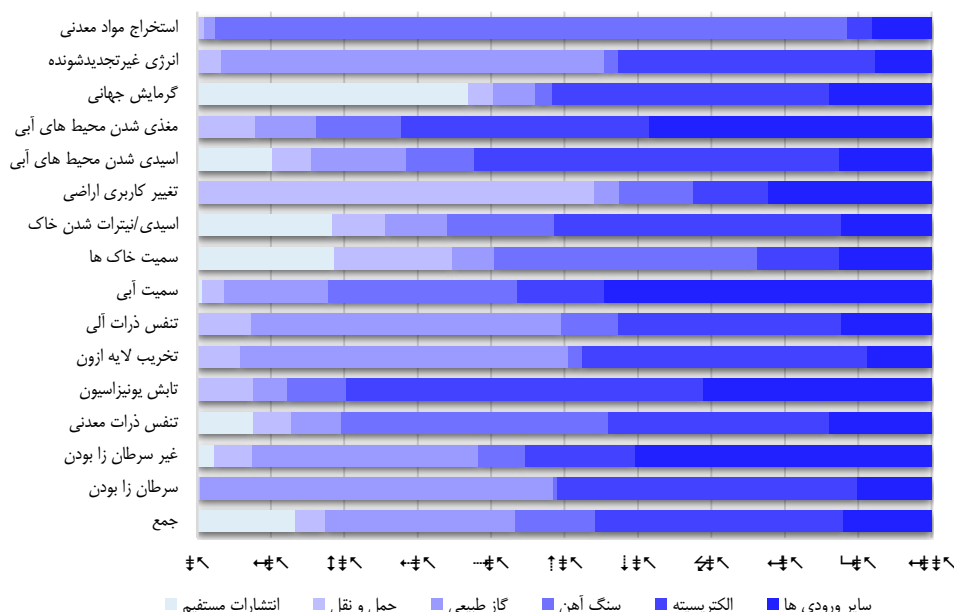
مصرف برق با pt ۰/۲۱۴ (۳۳/۸ درصد) در رده نخست قرار داشت و به دنبال آن، مصرف گاز طبیعی با pt ۰/۱۶۴ (۲۵/۸ درصد) در جایگاه بعدی قرار گرفت. همچنین، انتشارات مستقیم (۱۳/۳ درصد) و سنگ آهن (۱۰/۹ درصد) با اختلاف اندک نسبت به هم، به ترتیب در جایگاه‌های سوم و چهارم قرار داشتند که در شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است.



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



شکل ۴. سهم هر یک از فرایندها در شاخص میانی نمره منفرد شده زیست محیطی تولید یک تن فولاد نورد شده



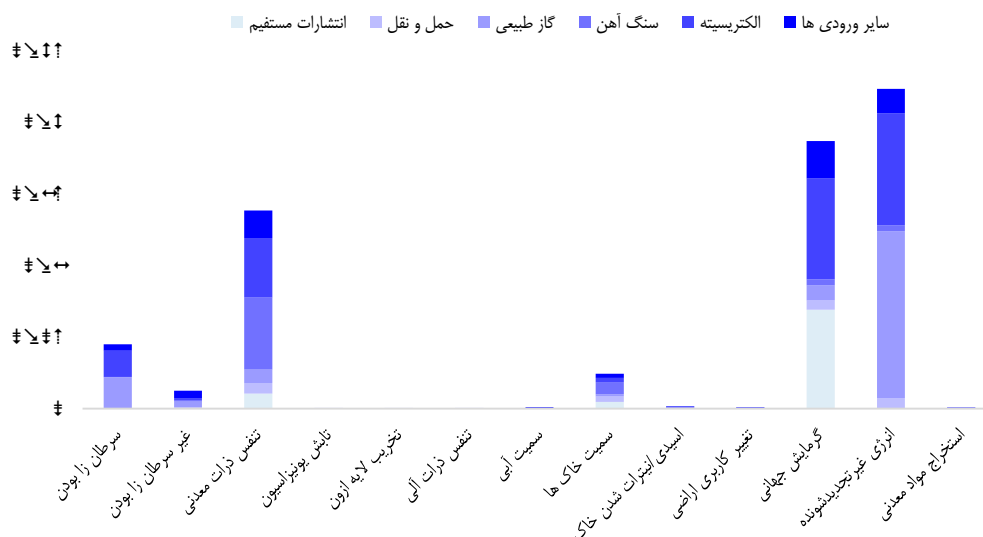
شکل ۵. سهم هر یک از نهاده‌های ورودی در شاخص میانی زیست محیطی تولید یک تن فولاد نورد شده

انتشارات مستقیم طی فرایندهای تولید می‌باشد. تنفس ذرات معدنی هم ۲۲/۱ درصد از کل تأثیرات را شامل شد که ۳۶/۲ و ۳۰/۱ درصد آن به ترتیب به دلیل استفاده از سنگ آهن و برق مصرفی می‌باشد.

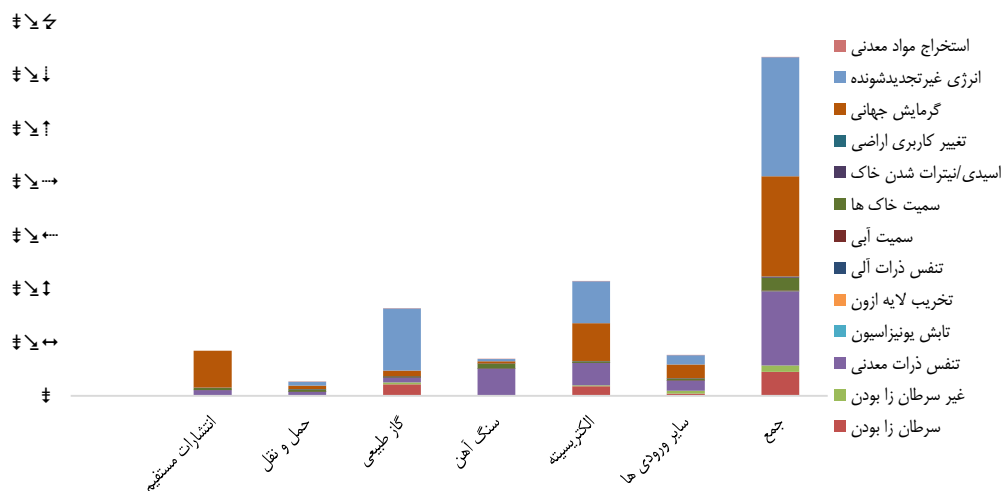
پیشنهاد برای تولید پایدار

صنایع آهن و فولاد در دهه‌های اخیر به پیشرفت‌های قابل توجهی دست یافته است، اما هنوز برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن دی‌اکسید، پتانسیل‌های زیادی تا حدود ۲۰ درصد وجود دارد (۲۰).

اثرات حاصل از الکتریسیته، گاز مصرفی، اثرات انتشارات مستقیم، سنگ آهن و حمل و نقل در مجموع حدود ۸۸ درصد از کل اثرات را تشکیل داد و بقیه موارد ۱۲ درصد از تأثیرات کل را شامل شد. انرژی غیر تجدید شونده ۳۵ درصد از تأثیرات کل را در برگرفت که ۵۲/۲ درصد آن به دلیل مصرف گاز طبیعی و ۳۵/۱ درصد آن به دلیل مصرف برق در طی مسیر تولید می‌باشد. گرمایش جهانی نیز ۲۹/۴ درصد از کل تأثیرات زیست محیطی را به خود اختصاص داده است که ۳۷/۷ درصد آن به دلیل مصرف برق و ۳۶/۹ درصد نیز به علت



شکل ۶. سهم هر یک از نهاده‌های ورودی در شاخص میانی نرمال شده زیست محیطی تولید یک تن فولاد نورد شده



شکل ۷. سهم هر یک از نهاده‌های ورودی در شاخص میانی نمره منفرد شده زیست محیطی تولید یک تن فولاد نورد شده

کمک نماید (۲۵، ۲۴). استفاده از سوخت‌های کمکی مانند گاز طبیعی در کوره نیز می‌تواند مصرف برق را کاهش دهد؛ به طوری که با مصرف ۷ مترمکعب گاز طبیعی به ازای ۱ تن فولاد مذاب، می‌توان مصرف برق را ۵۰ کیلووات ساعت کاهش داد (۲۲).

نتیجه‌گیری

صنعت فولاد از صنایع بسیار پرمصرف است که انتشارات آن تأثیرات مخربی بر گرمایش کره زمین دارد. انجام یک ارزیابی چرخه حیات فولاد، امکان شناسایی فرایندهای دارای بیشترین آلودگی را به تولیدکنندگان می‌دهد تا برنامه‌ریزی‌های لازم برای بهبود روند آن انجام شود. در پژوهش حاضر اثرات زیست محیطی تولید فولاد به روش EAF که ورودی آن به نسبت ۹۰ به ۱۰ آهن اسفنجی بر پایه گاز و آهن قراضه می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت که روش تولید ۷۷ درصد از فولاد کشور است. نتایج نشان داد که بیشترین اثرات زیست محیطی حاصل از مواد ورودی به ترتیب شامل برق مصرفی، مصرف گاز، انتشارات مستقیم و سنگ آهن می‌باشد. نتایج حاصل از فرایندها نیز حاکی از آن بود که فرایندهای EAF، تولید آهن اسفنجی و تولید گندله به ترتیب بیشترین سهم را در کل اثرات زیست محیطی داشتند و سه شاخص زیست محیطی «انرژی غیر تجدید شونده، گرمایش جهانی و تنفس ذرات معدنی» که در مجموع ۸۶/۳ درصد از کل اثرات زیست محیطی را تشکیل می‌دهند، از عمده شاخص‌های اصلی تأثیرگذار در این فرایندها بود. امید است نتایج به دست آمده بتواند به شاغلان و تصمیم‌گیرندگان در زمینه تولید فولاد به منظور درک ماهیت روش ارزیابی چرخه حیات و اهمیت جلوگیری از آلودگی در یک کارخانه فولاد کمک کند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله نویسندگان از تمام افرادی که در انجام این مطالعه همکاری نمودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند.

بازده واقعی تولید جهانی فولاد تنها ۳۲/۹ درصد می‌باشد که دلیل آن، مقدار زیاد انرژی هدر رفته است (۲۱). به منظور کاهش تأثیرات زیست محیطی، اولویت دادن به فرایندهایی که بیشترین سهم را در آن شاخص‌ها دارند، معقول به نظر می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که فرایندهای EAF بیشترین سهم را در کل اثرات زیست محیطی دارند. برای فرایند EAF، اثرات انرژی غیر تجدید شونده، گرمایش جهانی و تنفس ذرات معدنی به طور عمده ناشی از مصرف برق می‌باشد که با تغییر سیستم شارژ کوره و استفاده از قراضه با ناخالصی کمتر و مواد ورودی با کیفیت‌تر، می‌توان مصرف آن را کاهش داد.

یکی از موارد تأثیرگذار بر تولید در فولادسازی، ناخالصی قراضه است. ورود این مواد به EAF، منجر به افزایش مصرف انرژی می‌گردد؛ چرا که این ناخالصی‌ها انرژی جذب می‌کنند. پیش‌گرمایش قراضه آهن مصرفی، منجر به حذف رطوبت، مواد فرار، هیدروکربن‌هایی مانند پلاستیک‌ها، رنگ‌ها و روغن‌ها از EAF می‌شود. پیش‌گرمایش قراضه و آهن اسفنجی می‌تواند زمان لازم برای ذوب و در نتیجه، مصرف برق را کاهش دهد و در نهایت، میزان گرد و غبار خروجی از این کوره نیز کاهش می‌یابد. طبق نتایج پژوهش Hilmawan و همکاران، با کاهش زمان تخلیه از ۹۰ به ۶۰ دقیقه، می‌توان ۵۰ کیلووات ساعت به ازای تولید ۱ تن فولاد مذاب در مصرف انرژی الکتریکی صرفه‌جویی کرد (۲۲). با توجه به نتایج مربوط به ورودی‌ها، حمل و نقل از عوامل مؤثر بود. بر همین اساس، نزدیکی دو فرایند تولید آهن اسفنجی و EAF به یکدیگر، نه تنها موجب حذف فرایند حمل و نقل می‌شود، بلکه می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی الکتریکی EAF کند؛ چراکه در این حالت، خروجی فرایند تولید آهن اسفنجی به صورت کاملاً داغ و با درجه حرارت بالا به طور مستقیم به مخزن ذخیره آهن اسفنجی در بالای EAF منتقل می‌شود. میزان انرژی مربوط به گازهای خروجی از EAF حدود ۳۰ درصد از کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد (۲۳). بنابراین، استفاده از انرژی حرارتی گازهای خروجی از EAF می‌تواند به عنوان منبع عظیم انرژی برای پیش‌گرمایش آهن اسفنجی و آهن قراضه استفاده گردد و به صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی در EAF

References

1. 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.
2. 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.
3. World Steel Association. Global crude steel output decreases by 0.9% in 2020 [Online]. [cited 2021 Jan 26]; Available from: URL: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/global-crude-steel-output-decreases-by-0-9-in-2020/#:~:text=Global%20crude%20steel%20production%20reached,by%200.9%25%20compared%20to%202019.&text=Asia%20produced%201%2C374.9%20Mt%20of,of%201.5%25%20compared%20to%202019>
4. Midrex Technologies. 2019 World Direct Reduction Statistics [Online]. [cited 2020]; Available from: URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-STATSbook2019Final.pdf>
5. de Boer IJM. Environmental impact assessment of conventional and organic milk production. *Livest Prod Sci* 2003; 80(1): 69-77.
6. 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.
7. 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].
8. 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.
9. 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.
10. Tongpool R, Jirajariyavech A, Yuvaniyama C, Mungcharoen T. Analysis of steel production in Thailand: Environmental impacts and solutions. *Energy* 2010; 35(10): 4192-200.
11. 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.
12. Burchart-Korol D. Life cycle assessment of steel production in Poland: A case study. *J Clean Prod* 2013; 54: 235-43.
13. Wang S, Li H, Li C, Hao X, Bao Q, Zhang L. LCA evaluation for different treatment processes of nickel laterite ore. In: Jha A, Wang C, Neelameggham NR, Guillen DP, Li L, Belt CK, et al., editors. *Energy technology 2015: Carbon dioxide management and other technologies*. Cham: Springer International Publishing; 2016. p. 93-103.
14. Lin YP, Wang WH, Pan SY, Ho CC, Hou CJ, Chiang PC. Environmental impacts and benefits of organic Rankine cycle power generation technology and wood pellet fuel exemplified by electric arc furnace steel industry. *Appl Energy* 2016; 183: 369-79.
15. Chen Q, Gu Y, Tang Z, Wei W, Sun Y. Assessment of low-carbon iron and steel production with CO₂ recycling and utilization technologies: A case study in China. *Appl Energy* 2018; 220: 192-207.
16. Li F, Chu M, Tang J, Liu Z, Wang J, Li S. Life-cycle assessment of the coal gasification-shaft furnace-electric furnace steel production process. *J Clean Prod* 2021; 287: 125075.
17. International Organization for Standardization. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework: ISO 14040:2006 [Online]; [cite 2006]; Available from: URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>
18. Jolliet O, Margni M, Charles RL, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, et al. IMPACT 2002+: A new life cycle assessment methodology. *Int J Life Cycle Assess* 2003; 8(6): 324-30.
19. Humbert S, Schryver A, Bengoa X, Margni M, Jolliet O. IMPACT 2002+: User Guide [Online]. [cited 2012 Nov 1]; Available from: URL: <https://pdf4pro.com/view/impact-2002-user-guide-quantis-1ec3ef.html>
20. Wang RQ, Jiang L, Wang YD, Roskilly AP. Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review. *J Clean Prod* 2020; 274: 122997.
21. Gonzalez Hernandez A, Paoli L, Cullen JM. How resource-efficient is the global steel industry? *Resour Conserv Recycl* 2018; 133: 132-45.
22. Hilmawan E, Palaloi S, Rosmawar E. The study on energy conservation and efficiency improvement in the Republic of Indonesia. JICA Project Report, 2011 [Online]. Available from: URL: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11949294_03.pdf
23. Zhao X, Bai H, Hao J. A review on the optimal scheduling of byproduct gases in steel making industry. *Energy Procedia* 2017; 142: 2852-7.
24. He K, Wang L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2017; 70: 1022-39.
25. Jouhara H, Khordeghah N, Almahmoud S, Delpech B, Chauhan A, Tassou SA. Waste heat recovery technologies and applications. *Therm Sci Eng Prog* 2018; 6: 268-89.