



مروری جامع بر روی فناوری های کنترل و کاهش کربن دی اکسید (CO_2) در صنعت آهن و فولاد (کربن زدایی) و بهینه سازی اثرات زیست محیطی

عرفان محمدزاده^۱، دکتر سید خطیب الاسلام صدرنژاد^۲، دکتر حسین یوزباشی زاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲ و ۳ - هیات علمی

۱ و ۲ - دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

erfan.mohamadzadeh22@sharif.edu

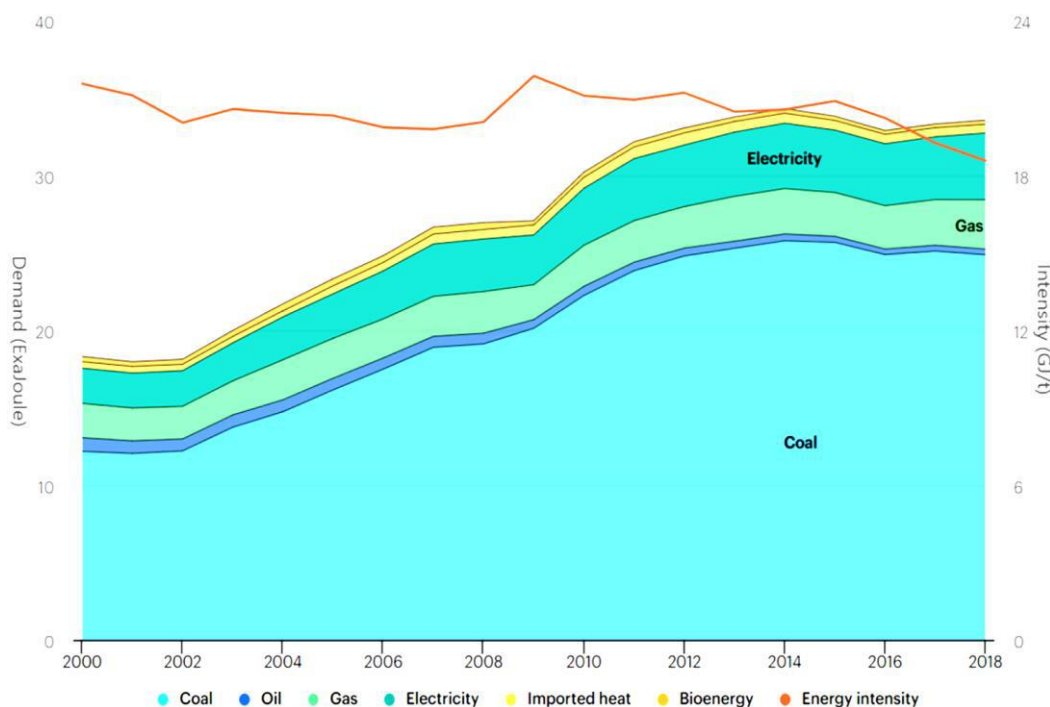
چکیده

صنعت آهن و فولاد به عنوان بزرگترین بخش تولیدی، مهم ترین مصرف کننده انرژی در جهان است. مسئول انتشار ۴ تا ۵ درصد از کل CO_2 تولید شده توسط سایر فعالیت های انسانی است. با توجه به افزایش مداوم تقاضا برای محصولات آهن و فولاد برای نیاز های مختلف، استفاده از انرژی سوخت فسیلی و انتشار CO_2 در این صنعت همچنان رشد خواهد کرد. با توجه به این که صنعت آهن و فولاد بزرگترین مصرف کننده زغال سنگ است و بیشترین گازهای گلخانه ای را منتشر می کند، تقریباً ۷ درصد از انرژی جهان را مصرف می کند و طبق برآورد های انجام شده در سال های اخیر، ۷ تا ۹ درصد از انتشار گازهای گلخانه ای جهانی را به خود اختصاص می دهد که نسبت به گذشته، افزایش یافته است. از این رو، کربن زدایی صنعت آهن و فولاد، یک هدف راهبردی برای دستیابی به اهداف کاهش انتشار کربن در راستای سیاست های تغییرات آب و هوایی و در عین حال حفظ رقابت اقتصادی است. فن آوری های جذب کربن (CC) برای دستیابی به این اهداف اهمیت حیاتی دارند. این روش ها، مهم ترین راحل های سیستماتیک ادغام فن آوری های CC در مسیر فولاد سازی کوره بلند- کوره پایه اکسیژن (BF-BOF) را ارائه می کند، که انتظار می رود مسیر غالب را حفظ کند. جریان های گاز (BOF, COG, BFG) گاز خارج شده، ذخیره شده در سرباره مذاب و محصولات، راحل مؤثری برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن در تولید آهن و فولاد است. از آنجایی که کوره بلند (BF) بزرگترین منبع انتشار مستقیم CO_2 در کارخانه فولاد یکپارچه است، استفاده از مواد اولیه با کیفیت بالاتر و تغییر ترکیب سوخت با ضریب انتشار کربن کمتر (جایگزینی سوخت های مبتنی بر زغال سنگ و گاز طبیعی با زیست توده مانند زغال چوب یا گاز سنتز شده) راحل مناسب تری می باشد. بنابراین نیروی محرکه قوی برای توسعه و اجرای فناوری های کاهش کربن دی اکسید و همچنین برنامه های کاهش این مورد برای این صنعت وجود دارد. افزایش توسعه و استقرار فن آوری های بازیابی انرژی حرارتی مواد شارژی در دمای بالا در کنار ترکیبی مطلوب از فن آوری های جذب و ذخیره سازی کربن (CCS) راحل مؤثری برای کاهش انتشار CO_2 از تولید آهن و فولاد خواهد بود.

کلمات کلیدی: آهن و فولاد، کربن دی اکسید، کوره بلند، زغال سنگ، گازهای گلخانه ای

۱. مقدمه

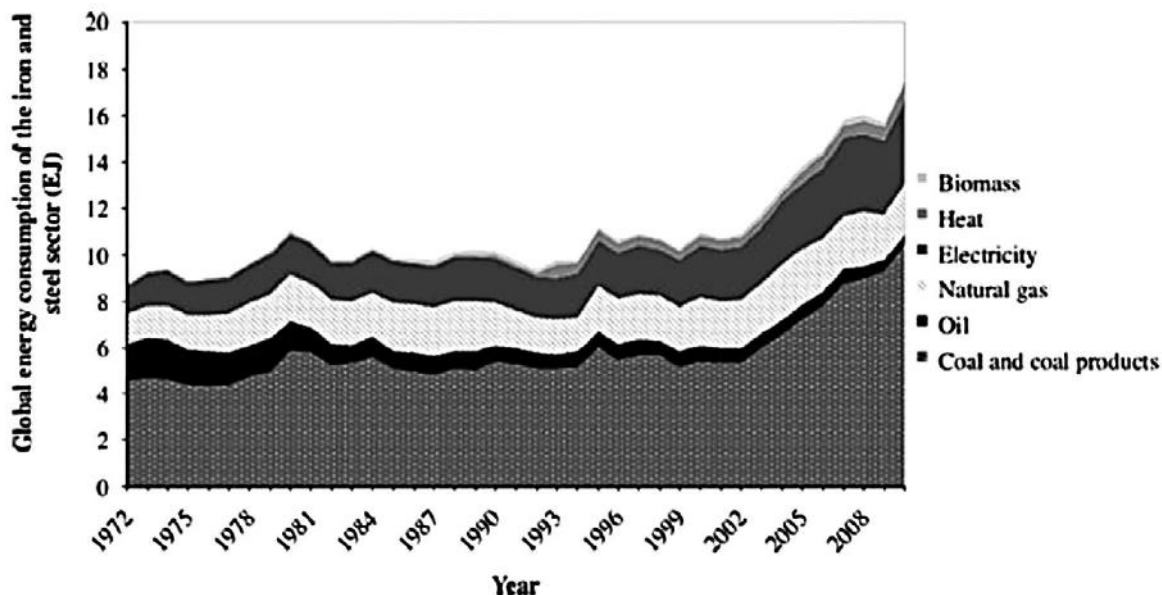
صنعت فولاد بزرگترین تولید کننده CO₂ در جهان و دومین مصرف کننده بزرگ انرژی است [۱]. فرآیند های ساخت آهن و فولاد هنوز هم عمدتاً مبتنی بر زغال سنگ هستند و بنابراین به شدت به سوخت های فسیلی وابسته هستند و مقدار قابل توجهی CO₂ آزاد می کنند و سهم قابل توجهی در انتشار جهانی CO₂ دارد [۲]. آهن و فولاد، امروزه در زندگی مدرن اهمیت ویژه ای پیدا کرده است. ساختمان ها، آسمان خراش ها، پل ها، برج های انتقال نیرو، هواپیماها، اتومبیل ها و کشتی ها همگی از آهن و فولاد در ساخت خود استفاده زیادی می کنند. در نتیجه، تقاضا برای استفاده از آهن و فولاد از سال ۱۹۷۰ بیش از سه برابر افزایش یافته است و ۹۵ درصد از کل فلزات تولید شده سالانه در جهان را تشکیل می دهد [۳]. آهن و فولاد نیز اجزای ضروری برای انتقال انرژی هستند، از قبیل منابع انرژی های تجدیدپذیر از جمله پنل های خورشیدی، تاسیسات زمین گرمایی و خودرو های الکتریکی به طور قابل توجهی به آهن و فولاد متکی هستند که ۷۱ تا ۷۹ درصد را تشکیل می دهند. از آنجایی که فولاد برای اقتصاد های مدرن و فناوری جدید حیاتی است، پیش بینی می شود که تقاضای فولاد به دلیل ارتباط مستقیم آن با جمعیت، رشد تولید ناخالص داخلی و صنعتی شدن عمومی، در سال های آینده به طور قابل توجهی افزایش یابد. رشد اقتصادی اقتصاد های نوظهور در کشور های مختلف پیشرفته در حوزه صنعت مکمل روند تقاضا است که قبلاً در ایالات متحده، اروپا و چین دیده شده است. بنابراین، تولید آهن و فولاد نقش مهمی در تضمین اینکه میلیارد ها نفر ممکن است استاندارد زندگی خود را در دهه های آینده بهبود بخشند، ایفا خواهد کرد. برای همه این اقدام مورد نیاز رفا بشر، آهن و فولاد، نیاز به منابع انرژی عظیمی است. همانطور که شکل ۱ نشان می دهد، بخش آهن و فولاد از ۳۳.۵۷ اگزاجول انرژی در سال ۲۰۱۸ استفاده کرده است [۴].



شکل ۱ - نیاز صنعت آهن و فولاد به انرژی در بازه سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ [۴].

با توجه به شکل ۱، میتوان به این نتیجه رسید که در بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸، صنعت آهن و فولاد به شدت وابسته به مصرف انرژی است که با توجه به افزایش نیاز جامعه به این صنعت، این روند از سال ۲۰۱۸ به بعد همچنان صعودی می باشد. هزینه این انرژی مصرفی، تشکیل دهنده بخشی از هزینه های فولاد سازی را تشکیل می دهد [۵]. بنابراین با وجود چنین مشکلاتی، برای رسیدگی به مسائل مربوط به گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی، برای صنعت فولاد سازی بسیار مهم است که انتشار CO₂ را تا حد زیادی کاهش دهد. کاهش انتشار CO₂ از کارخانه فولاد را می توان در سه زمینه طبقه بندی کرد: کاهش تقاضای فولاد، افزایش بازیافت فولاد و نوآوری در فن آوری های تولید فولاد [۶]. بررسی شده است که بسیاری از گزینه های کربن زدایی بر روی صرفه جویی در انرژی تمرکز می کنند. به طور بحرانی، صنعت آهن و فولاد پس از تولید برق، دومین مصرف کننده بزرگ زغال سنگ است. زغال سنگ برای واکنش های شیمیایی در کوره ها برای تولید فولاد از سنگ آهن استفاده می شود و کوره بلند تا ۷۵ درصد انرژی مورد نیاز در تولید فولاد را مصرف می کند. ۲۵ درصد باقیمانده گرما را برای عملیات تف جوشی و کک سازی فراهم می کند [۷]. بنابراین، مسلماً غیرقابل اجتناب است که صنعت آهن و فولاد به شدت مسئول انتشار گاز های گلخانه ای جهانی (GHG) باشد و بنابراین در تغییرات آب و هوایی تاثیر دارد. بخش آهن و فولاد ۲.۶ گیگا تن دی اکسید کربن در سال منتشر می کند که ۷ درصد از انتشار جهانی ناشی از

مصرف انرژی و ۷ تا ۹ درصد از انتشار CO_2 انسانی جهانی است که بالاترین میزان در میان صنایع است [۸]. آهن و فولاد نیز به دلیل نیازهای حرارتی بالا، استفاده از کربن در فرآیند، یکی از سخت ترین صنایع برای کربن زدایی در نظر گرفته می شود. هیچ راه ساده ای برای تولید مقادیر قابل توجهی انرژی گرمایی برای بسیاری از فرآیندهای آهن و فولاد بدون انتشار CO_2 وجود ندارد و زغال سنگ اغلب به عنوان منبع گرما و جزئی از فرآیندهای تولید استفاده می شود [۹].

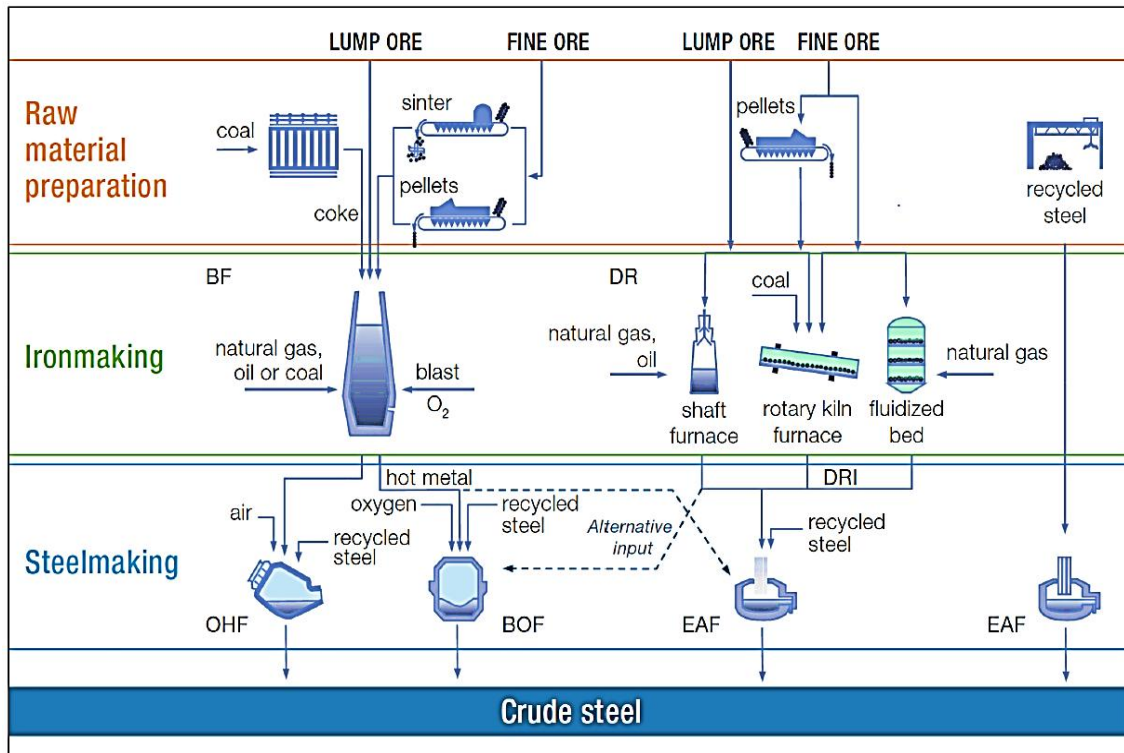


شکل ۲ - روند مصرف سوخت توسط صنعت آهن و فولاد [۱۴، ۱۵].

شکل ۲، کل مصرف انرژی جهانی بخش آهن و فولاد را بر اساس انواع سوخت از سال ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۰ نشان می دهد. در سال ۲۰۱۰، کل مصرف انرژی $EJ17.6$ بود در حالی که حدود $EJ10$ در سال ۱۹۹۰ بود که تقریباً تقاضای انرژی را دو برابر کرد. تقریباً ۶۰٪ انرژی در بخش آهن و فولاد از ذغال سنگ و زغال سنگ مصرف می شود که مسئول هزینه های زیادی است [۱۴، ۱۵].

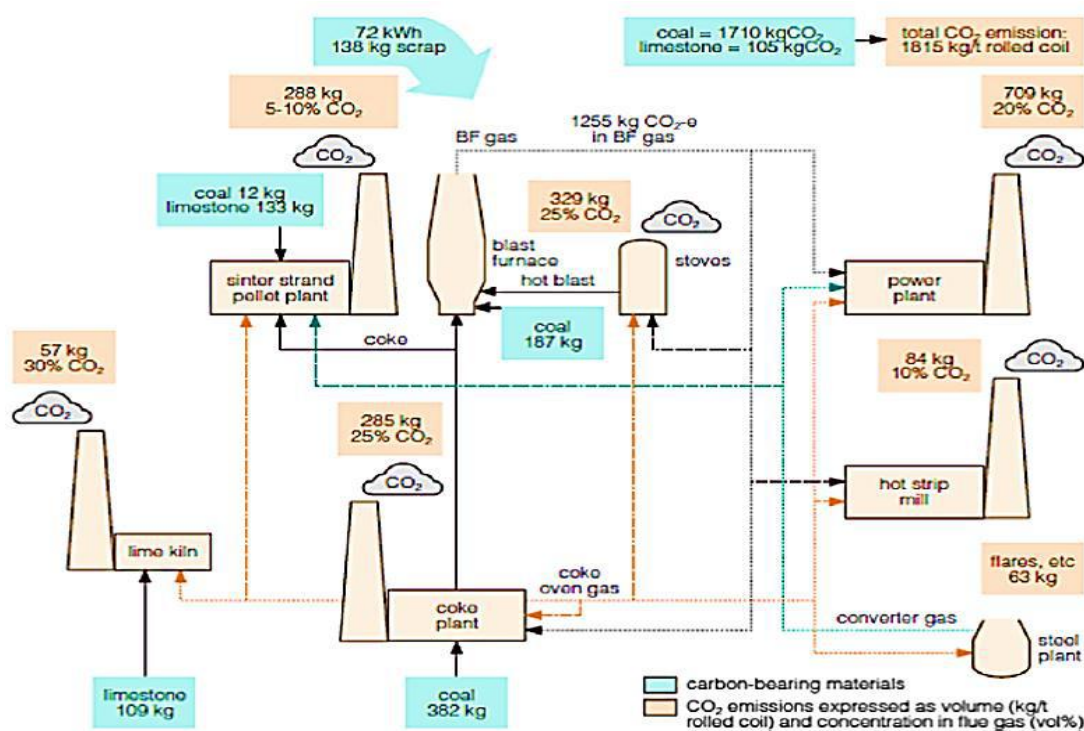
۲. بحث و بررسی

روش های مدرن فولاد سازی را می توان به چهار مسیر تقسیم کرد: کوره بلند/کوره اکسیژن پایه (BF/BOF)، کوره قوس الکتریکی (EAF)، احیای مستقیم)، کاهش ذوب، و ذوب مستقیم قراضه در EAF. [۱۰]. BF/BOF حدود ۶۵ درصد از تولید فولاد جهان در سال ۲۰۱۰ را به خود اختصاص داده و مسیر EAF حدود ۳۰ درصد در سال ۲۰۱۰ را به خود اختصاص داده است [۱۱]. در طی پژوهش هایی [۱۲] به این نتیجه رسیده شده است که در اروپا، ۵۸.۳٪ فولاد توسط BF/BOF تولید می شد، در حالی که ۴۱.۷٪ از EAF بود.

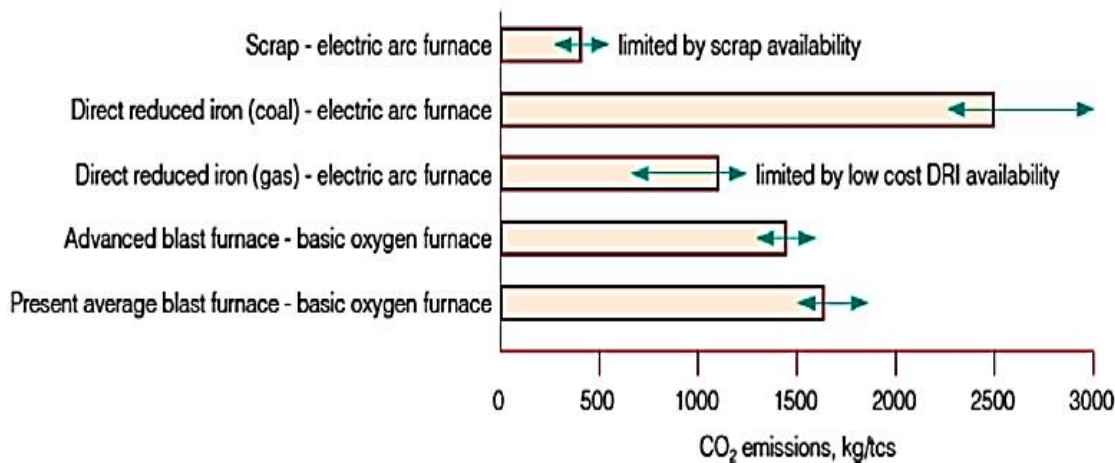


شکل ۳- مسیر های مشخص فرآیند تولید آهن و فولاد. BF کوره بلند، DR احیای مستقیم، BOF کوره اکسیژن پایه، EAF کوره قوس الکتریکی، OHF کوره اجاق باز و DRI آهن احیا شده مستقیم است [۱۳].

مشخصات انتشار CO_2 از کارخانه فولاد یکپارچه BF/BOF در شکل ۴ ارائه شده است. این توازن کربن را با منابع عمده (سنگ آهک زغال سنگ) و انتشار توده در حجم (کیلوگرم/اسیم پیچ گرم) و شدت CO_2 (حجم درصد) ساده می کند [۱۶]. واحد فرآیند اصلی و تولید فولاد که در آن مواد اولیه با احتراق سوخت ترکیب می شوند، به انتشار CO_2 کمک می کند [۱۷]. با توجه به شکل ۵، نشان می دهد که مسیر DRI/EAF مبتنی بر زغال سنگ مهم ترین منبع انتشار CO_2 در تولید آهن و فولاد است. انتشار CO_2 از مسیر قراضه/EAF کمتر از مسیر DRI/BOF و BF/BOF است. مسیرهای BOF، پیکان های شکل، مقدار انتشار CO_2 از تولید انرژی را نشان می دهند، با انتهای کوتاه و بلند پایان به ترتیب نشان دهنده برق بدون CO_2 و مبتنی بر زغال سنگ است [۱۸].



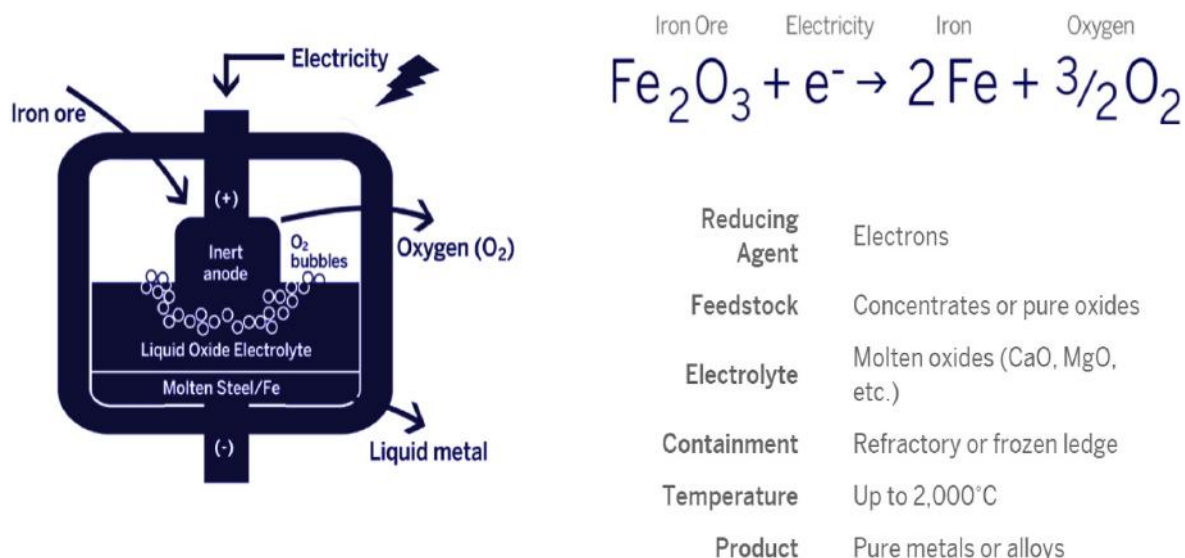
شکل ۴ - انتشار CO₂ از صنعت آهن و فولاد [۱۶].



شکل ۵ - انتشار از فرآیند تولید فولاد خام [۱۹].

کربن زدایی در صنعت آهن و فولاد دارای مزایای بسیاری است که می توان آنها را به سه دسته تقسیم بندی کرد: کاهش مصرف انرژی و کربن، صرفه جویی در هزینه و از همه مهم تر، به همراه داشتن مزایای زیست محیطی. اگر چه فناوری های موجود، فرآیند های فولادسازی را به محدودیت های ترمودینامیکی خود سوق می دهند، اما تحقیقات نشان دهنده پیشرفت های قابل توجه کربن زدایی است. این پیشرفت ها می تواند منجر به سود های مالی ناشی از صرفه جویی در انرژی و کربن در چندین سطح از سیستم اجتماعی فنی شود [۲۰]. تحقیقات نشان داده اند که، فناوری های صرفه جویی در انرژی، مانند مدیریت رطوبت زغال سنگ و احتراق هوا با دمای بالا، می تواند تقریباً نیمی از انتشار CO₂ از بخش تولید فولاد را کاهش دهد و انتشار گاز های

گلخانه ای را از ۱۴۶۹ میلیون تن در سال ۲۰۱۵ به ۷۱۰ میلیون تن کاهش دهد. [۲۱]۲۰۵۰. لازم به ذکر است که، برخلاف روش های مرسوم تولید فولاد، MOE هیچ CO₂ منتشر نمی کند [۲۲].

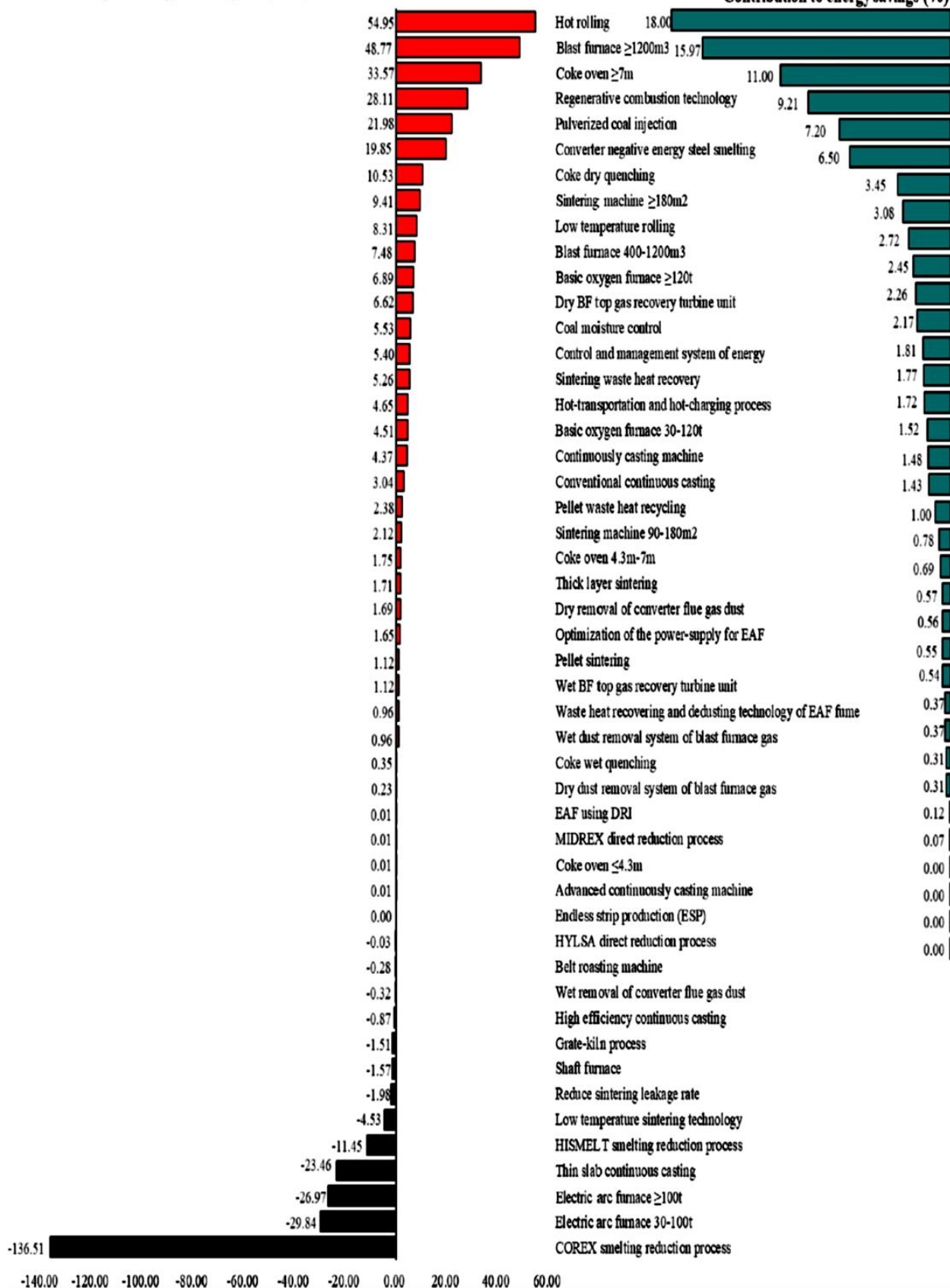


شکل ۵ - الکترولیت اکسید مذاب [۲۲].

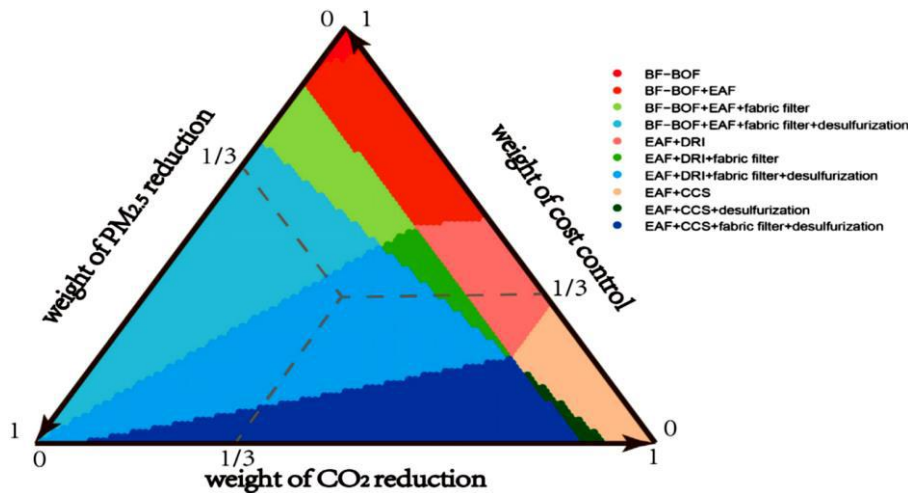
در این فرآیند، احتراق می تواند بیش از نیمی از انتشار CO₂ از بخش فولاد را حذف کند و انتشار گازهای گلخانه ای را ۱۴۶۹ میلیون تن در سال ۲۰۱۵ به ۷۱۰ میلیون تن تا سال ۲۰۵۰ کاهش دهد. [۲۳]. علیرغم اینکه کربن زدایی بخشی آهن و فولاد کار دشواری است، فناوری و سیاست های موثر می تواند به آینده ای پایدارتر از نظر محیط زیست و تولید اقتصادی منجر شود [۲۴]. بالاترین پتانسیل کربن زدایی بین سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۵۰ حدود ۱۵ درصد خواهد بود، با فرض کاهش شدت CO₂ در بخش های برق و افزایش عرضه قراضه. شکل ۶ بینش مفیدی را برای تعیین محل منشأ صرفه جویی در انرژی از روش های کربن زدایی ارائه می دهد. پژوهش های انجام شده نشان می دهد که فرآیند های تولید کلاسیک، مانند نورد گرم، کوره بلند، و کوره های کک (سه مورد برتر در شکل ۶)، دارای پتانسیل فوق العاده ای برای انرژی هستند [۲۵]. گزینه های شناخته شده برای کربن زدایی، مانند مشعل های احیا کننده و زغال سنگ پودر شده، قابل استفاده هستند که برای صنعت آهن و فولاد بسیار موثر هستند. استفاده از گزینه های کربن زدایی برای صنعت آهن و فولاد نیز می تواند آلاینده های هوا مانند ذرات معلق را کاهش دهد (شکل ۷) [۲۶].

The change of energy consumption (Mtce)

Contribution to energy savings (%)



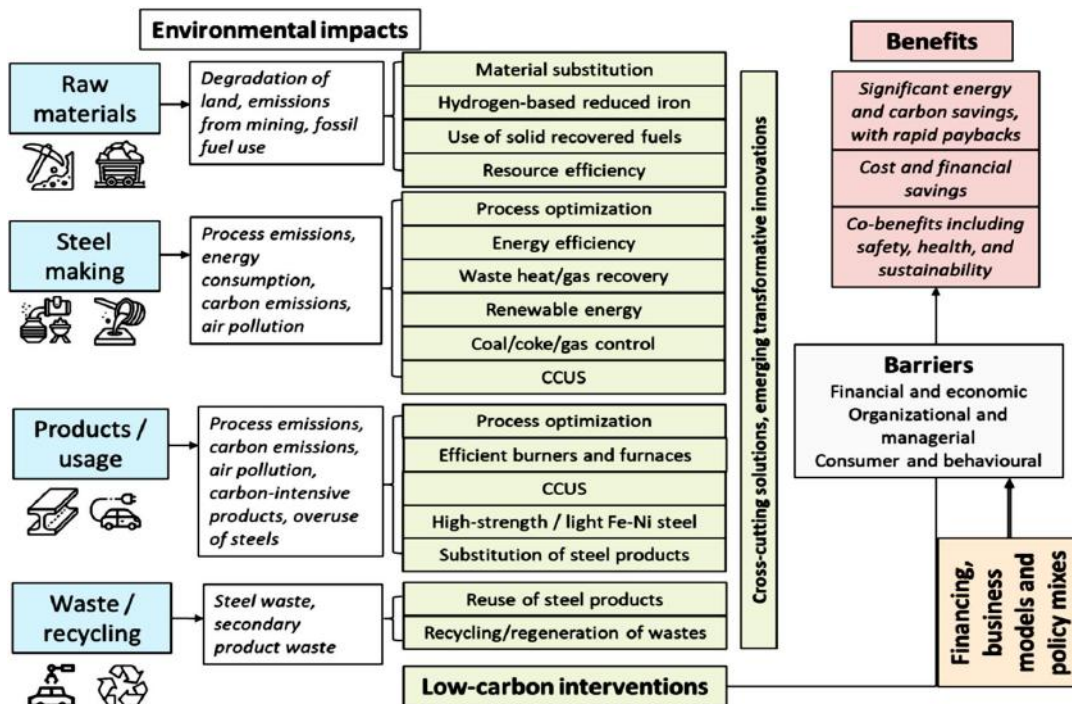
شکل ۶ - صرفه جویی در انرژی توسط هر فناوری در صنعت آهن و فولاد چین انجام می شود [۲۵].



شکل ۷ - رابطه بین کاهش CO₂، کاهش PM_{2.5}، و هزینه های مربوط به بخش آهن و فولاد [۲۶].

۲. نتیجه گیری

زندگی مدرن و امروزی حال حاضر انسان ها بر روی محصولات آهن و فولاد بنا شده است. برای ساخت ساختمان ها و آسمان خراش ها، برای حرکت هواپیما، وسایل نقلیه و پل ها، به آهن و فولاد نیاز داریم. حتی در آینده پایدار و کم کربن، ساختمان ها، حمل و نقل، زیرساخت ها و دستگاه هایی با استفاده از آهن و فولاد وجود دارند. این صنعت ضروری آهن و فولاد بیشترین انتشار کربن را در میان صنایع سنگین دارد و به طور موثری نزدیک به محدودیت های ترمودینامیکی خود عمل کرده است. بنابراین، برای شکستن حد، تلاش های نوآورانه کربن زدایی ضروری است. چند مورد بررسی هایی در این باره انجام شده است که در شکل ۸، قابل بررسی است. یکی از موثرترین روش ها برای کنترل کربن دی اکسید که گزینه های شناخته شده برای کربن زدایی است، مانند مشعل های احیا کننده و زغال سنگ پودر شده، قابل استفاده هستند که برای صنعت آهن و فولاد بسیار موثر هستند. استفاده از گزینه های کربن زدایی برای صنعت آهن و فولاد نیز می تواند آلاینده های هوا مانند ذرات معلق را کاهش دهد.



شکل ۸ - مزایا، موانع و سیاست ها برای کربن زدایی از سیستم اجتماعی فنی آهن و فولاد [۲۷].



۱۲. مراجع

- [1] Lee, M., Moon, K., Lee, K., Hong, J., & Pinedo, M. (2024). A critical review of planning and scheduling in steel-making and continuous casting in the steel industry. *Journal of the Operational Research Society*, 75(8), 1421-1455.
<https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2265416>
- [2] Helle, H. (2014). Towards sustainable Iron-and steelmaking with economic optimization (Doctoral dissertation, Åbo Akademi-Åbo Akademi University).
<https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2014032421667>
- [3] Fortier, S. M., Nassar, N. T., Kelley, K. D., Lederer, G. W., Mauk, J. L., Hammarstrom, J. M., ... & Seal, R. R. (2021). USGS critical minerals review. *Mining Engineering*, 73(5).
- [4] <https://www.iea.org/energy-system/industry/steel>
- [5] Hasanbeigi, A., Price, L. K., & McKane, A. T. (2010). The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for steelmaking handbook. Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate: Sydney, Australia.
- [6] Pauliuk, S., Milford, R. L., Muller, D. B., & Allwood, J. M. (2013). The steel scrap age. *Environmental science & technology*, 47(7), 3448-3454.
<https://doi.org/10.1021/es303149z>
- [7] Efficiency, E. (2007). Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions. *International Energy Agency*, 34(2), 1-12.
- [8] Hasanbeigi, A. (2013). Emerging energy-efficiency and carbon dioxide emissions-reduction technologies for the iron and steel industry.
- [9] Gielen, D., Saygin, D., Taibi, E., & Birat, J. P. (2020). Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study. *Journal of Industrial Ecology*, 24(5), 1113-1125.
- [10] Roudier, S., Sancho, L. D., Remus, R., & Aguado-Monsonet, M. (2013). Best Available Techniques (BAT) reference document for iron and steel production: Industrial emissions directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control (No. JRC69967). Joint Research Centre (Seville site).
- [11] Hasanbeigi, A. (2013). Emerging energy-efficiency and carbon dioxide emissions-reduction technologies for the iron and steel industry.
<https://escholarship.org/uc/item/5sw966f9>
- [12] Rechberger, K., Spanlang, A., Sasiain Conde, A., Wolfmeir, H., & Harris, C. (2020). Green hydrogen-based direct reduction for low-carbon steelmaking. *steel research international*, 91(11), 2000110.
<https://doi.org/10.1002/srin.202000110>
- [13] World Steel Association. (2016). Fact sheet: energy use in the steel industry. Worldsteel Committee on Economic Studies Brussels, Brussels.
<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f07b864c-908e-4229-9f92-669f>
- [14] Downie, C. (2020). Strategies for Survival: The International Energy Agency's response to a new world. *Energy Policy*, 141, 111452.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111452>
- [15] Khatib, H. (2012). IEA world energy outlook 2011—A comment. *Energy policy*, 48, 737-743.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.007>
- [16] Quader, M. A., Ahmed, S., Ghazilla, R. A. R., Ahmed, S., & Dahari, M. (2015). A comprehensive review on energy efficient CO2 breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 594-614.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.026>



[17] Hasanbeigi, A., Arens, M., & Price, L. (2014). Alternative emerging ironmaking technologies for energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 645-658.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.031>

[18] Quader, M. A., Ahmed, S., Ghazilla, R. A. R., Ahmed, S., & Dahari, M. (2016). Evaluation of criteria for CO₂ capture and storage in the iron and steel industry using the 2-tuple DEMATEL technique. *Journal of Cleaner Production*, 120, 207-220.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.056>

[19] Efficiency, E. (2007). Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions. *International Energy Agency*, 34(2), 1-12.

[20] Schuler, F., Voigt, N., Schmidt, T., Woertler, M., Dahmann, P., Ghenda, J. T., & Luengen, H. B. (2013). Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050. *Stahl und Eisen*, 133(9), 61-63.

[21] Chen, W., Yin, X., & Ma, D. (2014). A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO₂ emissions. *Applied Energy*, 136, 1174-1183.

[22] <https://www.bostonmetal.com/moe-technology/#moe-process>

[23] Chen, W., Yin, X., & Ma, D. (2014). A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO₂ emissions. *Applied Energy*, 136, 1174-1183.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.002>.

[24] Eurofer, L. C. R. (2019). Pathways to a CO₂-neutral European steel industry.

[25] An, R., Yu, B., Li, R., & Wei, Y. M. (2018). Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China's iron and steel industry. *Applied energy*, 226, 862-880.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.044>.

[26] Yang, H., Liu, J., Jiang, K., Meng, J., Guan, D., Xu, Y., & Tao, S. (2018). Multi-objective analysis of the co-mitigation of CO₂ and PM_{2.5} pollution by China's iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 185, 331-341.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.092>.

[27] Kim, J., Sovacool, B. K., Bazilian, M., Griffiths, S., Lee, J., Yang, M., & Lee, J. (2022). Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science*, 89, 102565.

<https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102565>