

نگاهی به چالش ها و فرصت های احیا مستقیم با هیدروژن برای تولید فولاد سبز

آیدین صادقیان پور¹، مسعود بقالپور²

¹مجمع صنایع قائم رضا

چکیده

برای دستیابی به اهداف توافق نامه پاریس لازم است تا صنعت فولاد به سمت کربن زدایی حرکت کند. گرچه راههای زیادی برای کربن زدایی وجود دارد ولی همان گونه که در مقاله حاضر تشریح می گردد تولید فولاد در کوره شفت احیا مستقیم و جایگزینی سوخت های فسیلی با هیدروژن در آن راکتور امیدبخش ترین روش برای رسیدن به اهداف توافق نامه پاریس تا سال 2050 می باشد. برای این منظور لازم است هیدروژن تولید شده بروش الکترولیز آب که منبع تامین انرژی آن از انرژی های تجدید پذیر مانند باد و خورشید باشد (هیدروژن سبز)، به داخل راکتور دمیده شود. اما جابجایی به سمت تولید فولاد سبز شامل چالش ها و فرصت های زیادی می باشد. از جمله چالش های آن می توان به سرمایه گذاری سنگین برای اصلاح یا ایجاد پلنت های جدید، تامین هیدروژن سبز، ایجاد زیرساخت های انتقال هیدروژن سبز، تامین انرژی تجدید پذیر در مقیاس بزرگ و برخی مسائل تکنولوژیکی-فرایندی مثل گرم کردن گاز هیدروژن قابل انفجار می باشد. از طرفی انتقال به فولاد سبز می تواند فرصت های نوآوری و رشد و بقاپذیری صنعت فولاد و همچنین فرصت های اقتصادی و مشاغل جدید ایجاد نماید.

کلمات کلیدی: احیا مستقیم با هیدروژن، فولاد سازی سبز، کربن زدایی صنعتی، الکترولیز آب، چالش ها

¹ SADEGHIAN-P@GHAEMREZA.COM

مقدمه

آب شدن یخچال های قطبی، طوفان های شدید، خشکسالی، بارش های سیل آسا و امواج گرما پدیده های آب و هوایی هستند که همگی بدلیل گرمایش جهانی در حال رخ دادن هستند. این معضلات باعث شد تا 196 کشور در گردهمایی پاریس در سال 2015 توافق نامه ای را امضا کنند و در آن متعهد شوند افزایش دمای کره زمین را نسبت به دوره قبل از صنعتی شدن به کمتر از دو درجه و ترجیحاً یک و نیم درجه محدود کنند. صنعت فولاد به عنوان دومین صنعت آلاینده جهان (بعد از صنعت سیمان) بیش از 7 درصد انتشار کربن با منشا انسانی را به خود اختصاص داده است [1]. طبق گزارش انجمن جهانی فولاد، در حال حاضر، فولادسازی به روش مرسوم سالانه حدود 3.6 میلیارد تن دی اکسید کربن تولید میکند [2]. غلظت بالای CO₂ در اتمسفر نقش زیادی در به دام افتادن انرژی خورشیدی و بالارفتن دمای کره زمین دارد. برای دستیابی به اهداف توافق نامه پاریس، انتشار کربن از تولید فولاد باید 90 درصد کاهش یابد. فولاد سبز به فولادی اطلاق می شود که با استفاده از فناوری های کم کربن یا کربن-خنثی² تولید میشود. در جدول یک نام بزرگترین تولید کنندگان فولاد جهان و برنامه های آنها برای رسیدن به سطح کربن خنثی دیده میشود.

کربن زدایی از صنعت فولاد

هم اکنون 73.2٪ فولاد جهان بر روش کوره بلند-کنورتور اکسیژنی و 26.3٪ بر روش کوره قوس تولید میشود و مابقی هم توسط سایر روش ها تولید می باشد. انتظار میرود که سهم تولید روش کوره قوس الکتریکی تا سال 2050 به 50٪ برسد. بطور کلی تولید فولاد در کوره بلند به حدود 800 کیلوگرم ذغال سنگ به ازاء تولید یک تن فولاد نیاز دارد و حدود 1.9 تن گاز کربنیک تولید میکند. پروژه های مختلفی در سرتاسر جهان برای کاهش انتشار گاز کربنیک از روش سنتی تولید فولاد (کوره بلند-کنورتور) در حال انجام است. از میان پروژه های مختلف می توان به استفاده از گاز کک غنی شده با هیدروژن در کوره بلند اشاره کرد که بطور همزمان در برخی پلنهای بزرگ کوره بلند در حال بررسی می باشد [3]. همچنین برخی از شرکت های بزرگ در حال پیاده سازی بازیابی گاز بالا³ و تزریق گاز تحت برنامه فولاد سازی با کاهش فوق العاده انتشار گاز کربنیک⁴ میباشند [4]. (فولاد سازی با کاهش فوق العاده انتشار گاز کربنیک، یک پروژه تحقیقاتی بین

² Carbon-neutrality (فرایندی که در آن میزان خالص انتشار صفر باشد)

³ Top Gas Recovery (TGR)

⁴ Ultra-Low Carbon Oxide Steel making (ULCOS)

المللی توسط اتحادیه اروپا و 48 شرکت بزرگ فولاد سازی است که در سال 2004 آغاز شده است و اخیراً به پایان رسیده است. هدف اصلی این پروژه، کاهش بیش از 50 درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید فولاد از طریق بهینه سازی فرآیندهای تولید، انتقال حرارت و انرژی، استفاده از سوخت‌های پایدار و ایجاد فناوری‌های جدید برای افزایش بازدهی و بهبود کیفیت فولاد بوده است). روش دیگری که تحت بررسی و آزمایش قرار گرفته است شامل تزریق جزئی هیدروژن به کوره بلند می باشد. گزارش شده که هیدروژن با غلظت 30٪ برای احیا سنگ آهن هماتیت بهینه می باشد [5].

در کوره قوس هرچه درصد شارژ آهن اسفنجی بالاتر رود میزان انتشار گاز کربنیک بالاتر خواهد بود. ترکیب بار کوره قوس الکتریکی شامل 80٪ آهن اسفنجی و 20٪ قراضه منجر به انتشار 885 تا 1125 کیلوگرم دی اکسید کربن به ازاء تولید یک تن فولاد مذاب می شود. ساخت یک پلنت پایلوت احیا مستقیم نشان داده است که جایگزینی 70٪ گاز طبیعی با هیدروژن و ذوب آهن اسفنجی در کوره قوس⁵ می تواند میزان انتشار گاز کربنیک را تا 90٪ در مقایسه با روش کوره بلند-کنورتور اکسیژنی کاهش داده و به مقدار ناچیز 150 کیلوگرم بر تن فولاد برساند [6]. نقشه راه اتحادیه اروپا برای کاهش 80 درصدی انتشار در سال 2050 در مقایسه با سال 2005 دو ابزار اصلی معرفی کرده است. اول استفاده هوشمندانه از کربن⁶ و دیگری اجتناب از کربن⁷. هدف روش استفاده هوشمندانه، توسعه فن آوری های موجود برای کاهش استفاده از کربن برای احیا سنگ آهن از یک سو و استفاده از CO/CO₂ حاصل از فرایند از سوی دیگر است. هدف روش اجتناب اما عدم استفاده از کربن برای احیا سنگ آهن با استفاده از فن آوری های کاملاً جدید مثل هیدروژن میباشد. همان گونه که در شکل یک نشان داده شده است توسعه تکنولوژی های موجود برای استفاده هوشمندانه از کربن و استفاده از فن آوری جذب و ذخیره کربن⁸ تنها می تواند انتشار کربن را 20٪ کاهش دهد. برای کاهش انتشار بمیزان 80٪ نیاز است فن آوری های جدید مثل استفاده از هیدروژن را بکار گرفت. هر چند استفاده از فن آوری های جدید منجر به افزایش هزینه تولید از 35 تا 100 درصد می گردد ولی برای رسیدن به اقدامات توافقی پاریس ضروری میباشد.

⁵ H₂ DRI-EAF

⁶ Smart Carbon Usage (SCU)

⁷ Carbon Direct Avoidance (CDA)

⁸ Carbon Capture Storage and Utilization (CCSU)

جایگزینی سوخت های فسیلی با هیدروژن

ایده استفاده از هیدروژن بجای کربن برای احیا سنگ آهن ایده جدیدی نمی باشد. در دهه 1980 در موسسه لئوبن سوئد احیا اکسیدهای آهن با استفاده از هیدروژن به موضوع اصلی تحقیقات تبدیل شد و چندین پایان نامه دکتری برای آن نگارش شد. فولاد سبز از هیدروژن برای تامین انرژی و عامل واکنش های احیاء استفاده می کند تا انتشار گازهای گلخانه ای به میزان قابل توجهی کاهش یابد. در حال حاضر، از فن آوری های هیدروژنی در حال پیشرفت می توان به احیاء ذوب پلاسمای هیدروژنی⁹ (یک فرایند فیزیکی-شیمیایی که مواد با استفاده از پلاسمای حاصل از هیدروژن، در دمای بالا ذوب و احیا می شوند)، آهن سازی فلاش هیدروژنی¹⁰ (فرایندی که در آن هیدروژن به صورت دما بالا و با سرعت بسیار زیادی از میان مواد معدنی آهن دار عبور می کند) و احیای مستقیم هیدروژنی در کوره شافت اشاره کرد. لازم بذکر است که گرچه پتانسیل احیا کنندگی هیدروژن در حالت پلاسمای 15 برابر بیشتر از هیدروژن مولکولی گازی می باشد، اما دو فناوری اول فقط در مقیاس آزمایشگاهی موفق هستند و هنوز به تولید صنعتی نرسیده اند [7].

پروژه های احیا مستقیم هیدروژنی

هیدروژن می تواند جایگزین کک به عنوان یک ماده کاهنده شده و در یک کوره شفت احیا مستقیم آهن اسفنجی تولید کند [8]. آهن اسفنجی حاصل را می توان به یک کوره قوس الکتریکی شارژ کرد تا فولادی بدون انتشار کربن تولید شود [9]. در این روش تقریباً 60 کیلوگرم هیدروژن برای تولید یک تن فولاد مورد نیاز است [10]. پروژه هیبریت¹¹ در شهر لولئو سوئد یک سرمایه گذاری مشترک بین یک تولید کننده سنگ آهن (LKAB)، یک تولید کننده فولاد (SAAB) و یک شرکت برق (Vattenfall)، با هدف جایگزینی یک کوره بلند با فناوری تولید فولاد کربن-خنثی تا سال 2030 است. این پروژه از هیدروژن برای احیا سنگ آهن در کوره شفتی استفاده می کند. هیدروژن مورد استفاده در این روش هیدروژن سبز می باشد و با استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر بدست آمده است. در این پروژه بجای انتشار گاز CO₂، آب تولید می شود. این پروژه در سال 2016 کلید خورده است و بعد از دو سال از شروع، یک پلنت پایلوت با ظرفیت یک تن بر ساعت ساخته

⁹Hydrogen Plasma Smelting Reduction (HPSR)

¹⁰Hydrogen Flash Ironmaking (HFI)

¹¹Hydrogen Break-Through Ironmaking Technology (HYBRIT)

فن آوری آهن سازی فوق پیشرفته هیدروژنی

شده است. این پروژه راه اندازی یک کارخانه در مقیاس تجاری تا سال 2026 را برنامه ریزی کرده است. گرمایش گاز بدون انرژی فسیلی یک چالش مهم در توسعه این پروژه می باشد.

مورد دیگر پروژه H2 GREEN STEEL در شهر بون سوئد باهدف تولید فولاد با استفاده از هیدروژن تولید شده از منابع انرژی تجدید پذیر می باشد. آنها امیدوارند که اولین محموله فولاد پروژه تا سال 2025 تولید شود. در این روش ابتدا الکترولیز در مقیاس بزرگ برای تجزیه آب به اکسیژن و هیدروژن انجام می شود. هدف بلند مدت این الکترولیزر غول پیکر تولید هیدروژن مورد نیاز برای تولید 5 میلیون تن فولاد تا سال 2030 می باشد. سپس احیاء سنگ آهن در راکتور انجام میشود و آهن اسفنجی تولید می شود که در این مرحله 95٪ انتشار گاز کربنیک کاهش مییابد. سپس آهن اسفنجی بصورت گرم به کوره قوس الکتریکی شارژ میشود که با جریان الکتروسیسته عاری از سوخت فسیلی کار می کند. فولاد مذاب تولید شده در پلنت تجمعی ریخته گری پیوسته و نورد به فرم محصول نهایی در می آید. این پلنت تجمعی مصرف انرژی را تا 70٪ کاهش خواهد داد. علاوه بر این دو پروژه، پلنت پایلوت احیا مستقیم هایفور¹² نیز در سال 2021 توسط پرایمتال ساخته شده است. فن آوری آنرا میتوان برای انواع سنگ معدن (هماتیت و مگنتیت) با اندازه ذرات تا 100٪ کوچکتر از 0.15 میلی متر بدون نیاز به گندله سازی بکار گرفت. این پلنت از واحد پیش گرمایش-اکسیداسیون، واحد احیا و واحد تصفیه گاز تشکیل شده است. در واحد پیش گرمایش-اکسیداسیون، کنسانتره سنگ معدنی تا حدود 900 درجه گرم میشود و به واحد احیا منتقل می شود. گاز احیایی مورد نیاز، هیدروژن، از خارج پلنت تامین میشود. واحد تصفیه گاز وظیفه باز چرخانی، تصفیه گاز و جلوگیری از انتشار آلاینده ها را برعهده دارد. هدف کاهش مصرف انرژی تا 20٪، کاهش انتشار CO₂ تا 100٪ و کاهش رد پای کربن تا 80٪ است.

چالش ها و فرصت ها

با توجه به اینکه اقتصاد جهانی سالانه حدود 1800 میلیون تن فولاد مصرف می کند، مقیاس تغییرات مورد نیاز برای انتقال به فولادسازی سبز دلهره آور است. انتظار می رود تغییرات کاری بسیار پرهزینه و وقت گیر باشد، اما پلنت هایی که مدرن نمیشوند می توانند برای همیشه از بین بروند. سرمایه گذاری های مورد نیاز برای کربن زدایی احتمالاً بیش از 1200 دلار در هر تن فولاد است. برای مثال شرکت فولادی که 5 میلیون تن فولاد

¹²(HYFOR) (HYdrogen-based Fine Ore Reduction) احیا نر مه سنگ آهن هیدروژنی

در سال تولید می کند به سرمایه گذاری تقریباً معادل 6 میلیارد دلار نیاز دارد. مساله دیگر این است که تولید فولاد با استفاده از هیدروژن به مقادیر بسیار زیادی هیدروژن نیاز خواهد داشت. هیدروژن با استفاده از الکترولیز آب در الکترولیزر تولید می شود. برق مورد نیاز الکترولیزها عموماً از منابع انرژی فسیلی تامین می شود که لازم است با انرژی های پاک جایگزین شود. در حال حاضر هنوز زیر ساخت های انتقال و ذخیره سازی هیدروژن توسعه نیافته اند. لازم است تا زیر ساخت های انتقال و ذخیره سازی هیدروژن ساخته و توسعه داده شوند تا امکان استفاده از هیدروژن در پلنت های فولاد سازی مهیا شود. در کوتاه مدت هزینه تامین انرژی لازم برای تولید هیدروژن از منابع تجدید پذیر بسیار بالاتر از سوخت های فسیلی می باشد. برای استفاده از هیدروژن سبز در تولید فولاد باید هزینه تامین انرژی های تجدید پذیر کاهش یافته و قابل رقابت با انرژی های فسیلی گردد. برای تولید یک تن فولاد سبز با هیدروژن به 3.48 MWh برق نیاز است. از این میزان دو سوم آن در الکترولیزر صرف جداسازی هیدروژن از آب می شود و کوره قوس و گرم کن سنگ آهن مصرف کننده های بعدی برق می باشند [11]. بسیاری از فناوری هایی که برای ساخت فولاد سبز در حال توسعه هستند هنوز در مراحل اولیه توسعه هستند و سطح بلوغ فناوری^{۱۳} پایینی دارند، بلوغ این فناوری ها نیازمند تحقیق و توسعه است. بعنوان مثال یکی از مشکلات فنی اندوترمیک بودن واکنش های احیایی هیدروژن می باشد که لازم است برای حل این مساله دمای ورود هیدروژن به کوره بالا رود. ولی در نظر گرفتن اینکه هیدروژن گازی قابل انفجار است خود موضوعی چالشی می باشد. علاوه بر این در احیا مستقیم مواد به فرم جامد بوده و دمای آنها به نقطه ذوب نمی رسد، لذا امکان جدا شدن ناخالصی ها از آهن اسفنجی بصورت سرباره نمی باشد و بنابراین الزام استفاده از خوراک با کیفیت موضوع چالشی های دیگری است. علاوه بر این مشکلات فنی باید در نظر داشت که فولادسازان در کشورهایی مانند هند و چین، سرمایه گذاری های سنگینی در کوره های بلند جدید با طول عمر طولانی نموده اند و این موضوع احتمالاً انتقال آن ها به روش های تولید فولاد سبز را کندتر خواهد کرد. به طور کلی، گذار به ساخت فولاد سبز یک فرآیند پیچیده است که به سرمایه گذاری قابل توجه، تحقیق و توسعه اساسی و حمایت نظارتی برای غلبه بر چالش ها نیاز دارد. تقاضای فزاینده برای تولید فولاد پایدار فرصت های جدیدی را برای نوآوری و رشد در صنعت فولاد سبز ایجاد کرده است. دولت ها در سرتاسر جهان مشوق هایی را برای ترویج تولید فولاد سبز ارائه می کنند. افزایش آگاهی عمومی از اثرات زیست محیطی تولید

¹³ Technology Readiness Level (TRL)

فولاد به روش سنتی نیز باعث افزایش تقاضا برای فولاد سبز خواهد شد. تجزیه و تحلیل Deloitte نشان می‌دهد که در اروپا تا سال 2030-2035، تقاضای بازار برای فولاد سبز احتمالاً از عرضه موجود فراتر خواهد رفت. به طور کلی، حرکت به سمت تولید فولاد پایدار فرصت قابل توجهی برای نوآوری و رشد در صنعت است. علاوه بر این، توسعه و استقرار فناوری‌های مرتبط با فولاد سبز می‌تواند فرصت‌های اقتصادی و مشاغل جدیدی را در بخش‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری پاک ایجاد کند. یک پنجره اقدام حیاتی از هم اکنون تا سال 2030 وجود دارد که حدود 70 درصد از کارخانه‌های فولاد در سراسر جهان در این دوره نیاز به تعمیر و سرمایه‌گذاری مجدد دارند و این پنجره فرصت مناسبی برای انتقال به فولاد سبز می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با انتقال به فولاد سبز، صنعت فولاد می‌تواند به طور قابل توجهی ردپای کربن را کاهش داده و به تلاش‌های جهانی برای کاهش تغییرات آب و هوایی کمک کند اما در این راه با چالش‌هایی همچون هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا، در دسترس نبودن فناوری و نیاز به یک زنجیره تامین قابل اعتماد هیدروژن سبز مواجه است.

مراجع

- [1] Hasan Muslemani, et al. "Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for green steel products", Journal of Cleaner Production, 2021, 315,
- [2] Abhinav Bhaskar, et al. "Decarbonizing primary steel production: Techno-economic assessment of a Hydrogen based green steel production plant in Norway", Journal of Cleaner Production, 2022, 350,
- [3] Liu, W., et al. "The production and application of hydrogen in steel industry", International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (17), pp 10548-10569.
- [4] Abdul Quader, et al. "Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO₂) Steelmaking (ULCOS) program Renew" Sustain. Energy, 2016. Rev. 55, pp537-549.
- [5] Sun, G., Li, B., Yang, W., Guo, J., Guo, H. "Analysis of energy consumption of the reduction of Fe₂O₃ by hydrogen and carbon monoxide mixtures", Energies, 2020, 13 (8), pp1986.
- [6] Montague, S. "Direct from Midrex 2021".
- [7] A. Fridman, "Plasma Chemistry", 2008, New York, Cambridge University Press,
- [8] DeCosta A.R. et al. "Modeling a new CO₂ emission, Hydrogen steel making process", Journal of cleaner production, 2013, 46, pp 27-35
- [9] Max Weigel et. al. "Multicriteria analysis of primary steelmaking technologies", Journal of cleaner production, 2016, 111 (1), pp 1064-1076

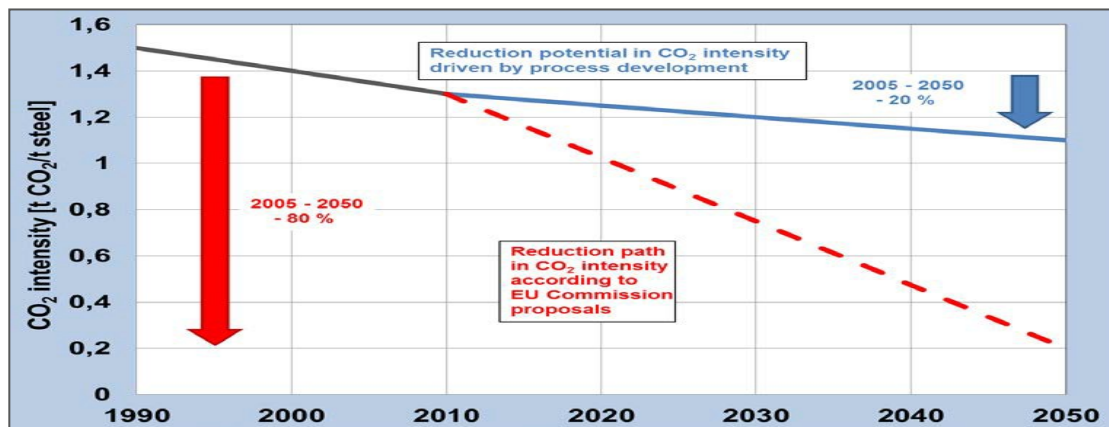
[10] Abhinav Bhaskar, Mohsen Assadi, Homam Nikpey Somehsaraei, "Can methane pyrolysis based hydrogen production lead to the decarbonization of iron and steel industry", Energy Conversion and Management, 2021, 10

[11] Vogl, V., et al., "Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking", Journal of Cleaner Production, 2018, pp 736-745.

جداول و اشکال

جدول 1. اهداف بزرگترین تولید کنندگان فولاد برای کاهش انتشار کربن [Industry Transition]

نام شرکت	تولید فولاد 2020 (میلیون تن)	هدف میان مدت کاهش انتشار کربن	هدف نهایی کاهش انتشار کربن
بائو استیل	120	30٪ تا 2035	کربن خنثی تا 2050
آرسلور میتال	79	25٪ تا 2030	کربن خنثی تا 2050
آن استیل	56	اعلام نشده	کربن خنثی تا 2060
نیپون استیل	50	30٪ تا 2030	کربن خنثی تا 2050
پوسکو	43	20٪ تا 2030	کربن خنثی تا 2050
جیان لونگ	37	20٪ تا 2033	کربن خنثی تا 2060
تانا استیل	31	اعلام نشده	کربن خنثی تا 2045



شکل 1. مسیرهای کاهش انتشار CO₂ با توسعه تکنولوژیهای موجود (خط آبی رنگ) و بکمک تکنولوژی

های جدید مثل استفاده از هیدروژن (خطچین قرمز) [Eurofer]