آهن و فولاد

"ویژه نامه کاهش انتشار دی اکسید کربن در صنعت فولاد"
شرکت فولاد مبارکه اصفهان
شماره چهل و چهارم، فروردین و اردیبهشت ماه
سال ۱۳۹۷

دوماهنامه آهن و فولاد
"ویژه نامه کاهش انتشار دی اکسید کربن
در صنعت فولاد"
شماره چهل و چهارم ، فروردین و
اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۷

صاحب امتیاز: شرکت فولاد مبارکه اصفهان
مدیر مسئول: محمدناظمی هرندی
سردبیر علمی: مسعود هراتیان

سردبیر اجرایی: رسول مهماندوست
دبیر اجرایی: سجاد امیری فارسانی

هیات تحریریه:
شهرام عباسی
محمد ناظمی هرندی
طهمورث جوانبخت
غلامرضا طاهری
مسعود هراتیان
علی مالکی
ابوذر طاهری زاده

نشانی:
اصفهان ، شرکت فولاد مبارکه اصفهان
تلفن : ۵۲۷۳۳۴۵۰-۰۳۱
دورنگار : ۵۲۷۳۳۷۸۰-۰۳۱
آدرس اینترنتی:
http://ironandsteel.msc.ir

نشریه در حک و اصلاح مطالب ارسالی آزاد است.
مقالات ارسالی برگشت داده نخواهد شد.
مسئولیت مطالب به عهده نویسنده آن است.
اصل تصاویر و عکس‌ها با کیفیت مطلوب ارسال گردد.
نقل مطالب با ذکر مأخذ بلامانع است.

شمارگان: ۳۰۰۰ جلد
قیمت: ۳۰۰۰ تومان
طرح جلد و صفحه آرایی: گرافیک نقطه
۰۹۱۳۳۰۰۸۱۹۳
چاپ: آرمان نو

فهرست

همکاری LKAB، SSAB و Vattenfall در احداث واحد نیمه صنعتی تولید فولاد بدون استفاده از سوخت‌های فسیلی
گردآوری: تحقیق و توسعه شرکت فولادمبارکه ۲

سهم فولاد در ایجاد آینده‌ای با کربن کم و جوامع مقاوم در برابر شرایط آب و هوایی
گردآوری: تحقیق و توسعه شرکت فولادمبارکه ۴

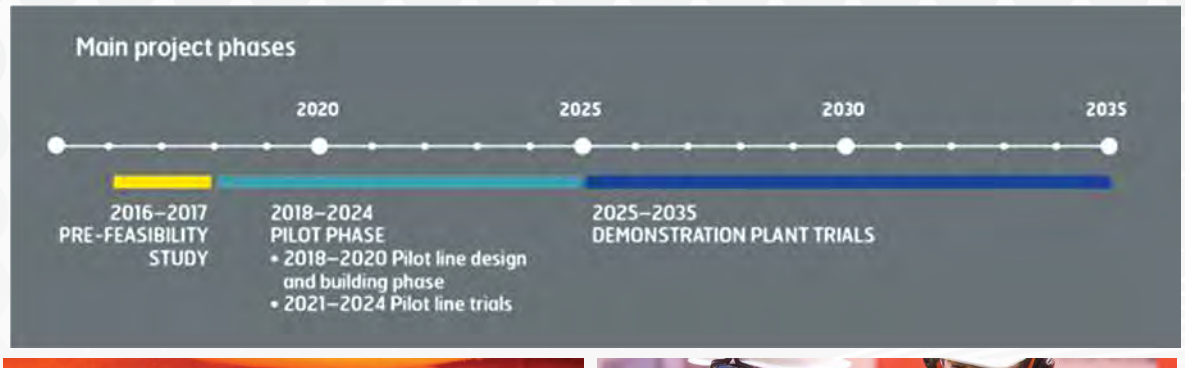
بررسی جامع آخرین دستاوردهای تکنولوژی در زمینه کاهش مصرف انرژی و انتشار CO_2 در راستای تولید و توسعه پایدار صنعت آهن و فولاد
گروه پژوهشی فرایند ، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان ۱۱

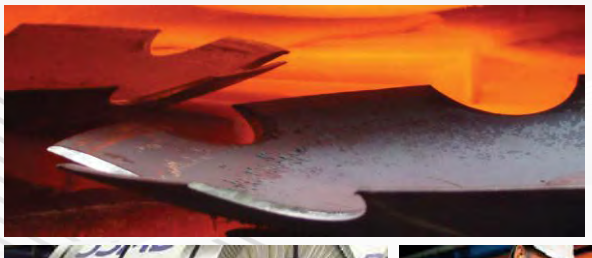
نیازهای حال حاضر، پیشرفت‌های اخیر و مسیر حرکت در آینده در خصوص برنامه فولادسازی با تولید بسیار ناچیز CO_2 و مصرف انرژی بهینه
گردآوری: تحقیق و توسعه شرکت فولادمبارکه ۴۴

راهنمای تهیه و تدوین مقالات دوماهنامه آهن و فولاد
۶۴

همکاری LKAB، SSAB و Vattenfall در احداث واحد نیمه صنعتی تولید فولاد بدون استفاده از سوخت‌های فسیلی

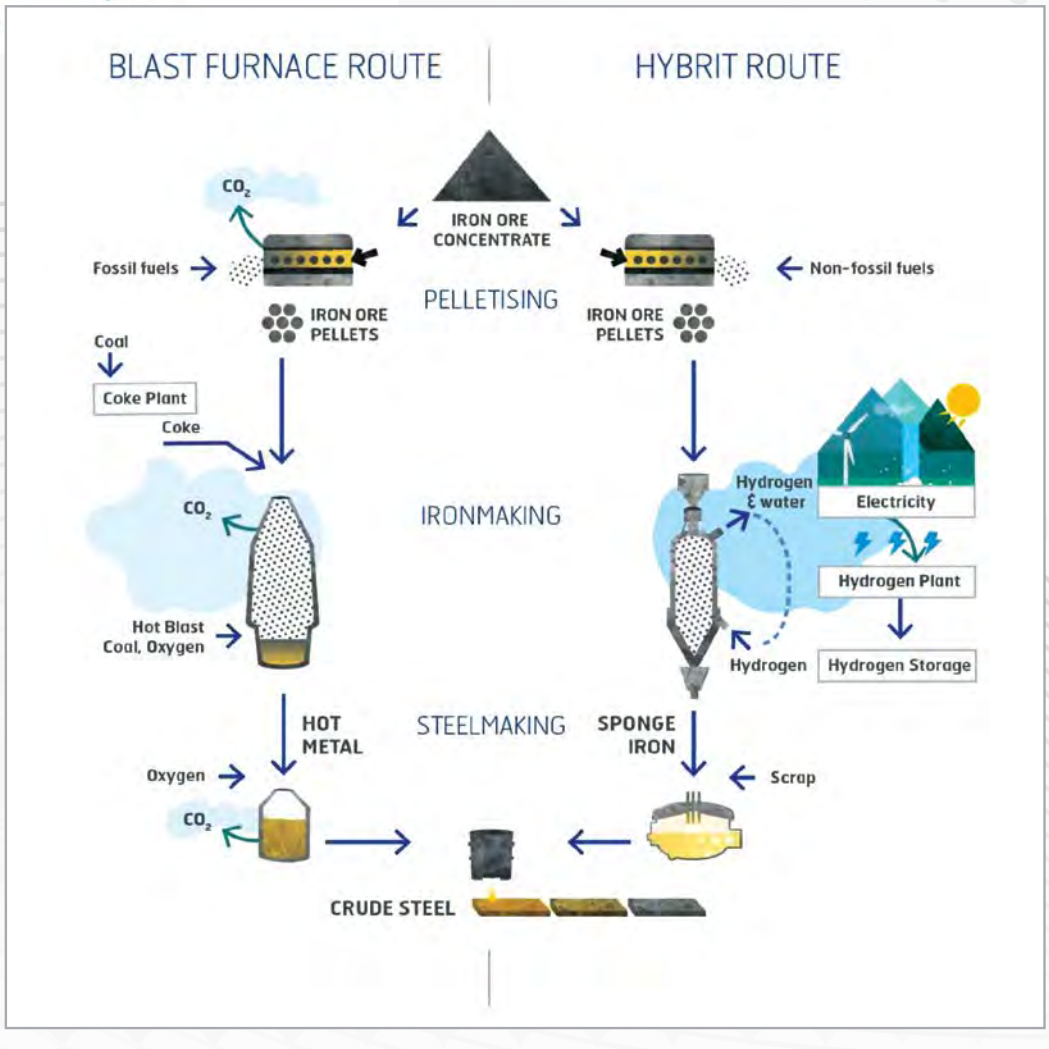
مطالعات امکان سنجی در شرکت‌های LKAB، SSAB و Vattenfall حاکی از شکل گیری برنامه‌ای به نام HYBRIT است که هدف آن تولید فولاد پاک بدون استفاده از سوخت‌های فسیلی (Fossil-free steel) است. در واقع هدف HYBRIT جایگزین کردن زغال سنگ کک شو با هیدروژن است. قرار است در بهار سال ۲۰۱۸ طرح ریزی و اقدامات اولیه برای احداث واحدی نیمه صنعتی در شمال کشور سوئد آغاز گردد که قادر به تولید فولاد پاک برای اولین بار در جهان باشد. انتظار می‌رود این پروژه در فاز طراحی و برنامه ریزی ۲۰ میلیون کرون (Swedish Krona) هزینه در بر داشته باشد. در این راستا آژانس انرژی سوئد اعلام کرده که نیمی از سرمایه گذاری را به عهده خواهد گرفت. نیمه دیگر بودجه مورد نیاز را سه شرکت LKAB، SSAB و Vattenfall تأمین می‌کنند. این ابتکار جدید قادر است نشر گاز CO_2 را تا ۱۰٪ در سوئد و ۷٪ در فنلاند کاهش دهد. هدف نهایی این طرح دستیابی به فرایندی کاملاً پاک و عاری از سوخت‌های فسیلی برای تولید فولاد تا سال ۲۰۳۵ است.





نتایج مطالعات امکان سنجی مشتمل بر محاسبات و بررسی پتانسیل‌های موجود برای تجاری سازی فرایند جدید نشان می‌دهد با توجه به قیمت برق و هزینه‌های مرتبط با زغال سنگ و نشر گاز CO_2، فولاد تولید شده با این فرایند حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد گران‌تر از روش‌های مرسوم است. با این حال با امید به کاهش قیمت برق در آینده که عمدتاً از منابع تجدید پذیر تأمین خواهد شد و همچنین با توجه به افزایش هزینه‌های مربوط به جرایم نشر گاز CO_2 که توسط سیستم تجارت انتشارات گازی اتحادیه اروپا (European Union Emission Trading System) اعمال خواهد شد، به نظر می‌رسد این فرایند در آینده بتواند با روش‌های سنتی رقابت کند.

فولاد در جامعه مدرن امروزی نقش مهمی ایفا می‌کند و انتظار می‌رود با توجه به نرخ رشد جمعیت در جهان و افزایش شهرنشینی، تقاضای جهانی برای این محصول افزایش یابد. با این اوصاف، در صورتی که تدبیری برای جایگزین کردن روش‌های سنتی تولید فولاد با فرایندهای پاک اندیشیده نشود، پیش بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ نشر گاز CO_2 تا ۲۵٪ افزایش یابد.



منبع:

https://www.ssab.com/globaldata/news-center/2018/02/01/06/31/ssab-lkab-and-vattenfall-to-build-a-globally-unique-pilot-plant-for-fossilfree-steel

سهم فولاد در ایجاد آینده‌ای با کربن کم و جوامع مقاوم در برابر شرایط آب و هوایی

تهیه و گردآوری: واحد تحقیق و توسعه

مشارکت دولت‌ها و صنایع فولاد برای ایجاد آینده‌ای پایدار و پاک امری اساسی است.

نقش فولاد در رفع نیازهای بشر در خصوص ایجاد زیرساخت‌ها و ساخت و سازهای مورد نیاز در سراسر دنیا بر کسی پوشیده نیست. فولاد ماده‌ای است که برای ساخت شهرهای مقاوم به شرایط آب و هوایی و کاهش آثار مخرب پدیده‌های طبیعی همواره مورد نیاز است. امروزه رشد جمعیت به همراه بهبود استانداردهای زندگی، فشار فزاینده‌ای به اکوسیستم کره زمین وارد می‌کند که در این خصوص می‌توان به افزایش نشر CO_2، مصرف منابع طبیعی کمیاب و معضل پسماندهای صنعتی اشاره نمود. در خصوص ارائه راهکار برای مقابله با این پدیده‌های مخرب زیست محیطی، پرداختن به صنعت فولاد از اهمیت بالایی برخوردار است.

فولاد ماده‌ای است که می‌توان آن را تا ابد بازیافت کرد. همچنین محصولات جانبی فرایند تولید فولاد و انرژی‌های تلف شده در آن، منابع ارزشمندی تلقی می‌شوند. از آنجایی که فولاد بخشی جدایی ناپذیر از اقتصاد دورانی به شمار می‌آید، می‌تواند نوید بخش آینده‌ای پایدار و پاک به لحاظ زیست محیطی باشد.

در چند دهه گذشته صنعت فولاد به لطف استفاده از تکنولوژی‌های جدید و راهکارهای نوین بهبود راندمان انرژی، کاهش قابل ملاحظه‌ای در خصوص نشر گازهای گلخانه‌ای داشته است که متضمن منافع زیست محیطی و اقتصادی است. کاهش گازهای گلخانه‌ای یک معضل جهانی است و بنابراین به راهکارهای جهانی نیاز دارد. در

این راستا صنعت فولاد همواره خود را متعهد به تلاش برای نیل به اهداف ترسیم شده جهت رسیدن به جوامع پاک و کم کربن می‌داند.

دولت‌ها، صنعت فولاد و دیگر نهادهای ذینفع برای غلبه بر مشکلات و چالش‌های موجود در زمینه‌های تکنولوژی و اقتصادی در این مسیر، چاره‌ای جز تشریک مساعی ندارند.

اول، دولت‌ها باید اهمیت بنیادهای قوی و سالم صنعتی در یک اقتصاد پایدار را بپذیرند. نقش صنعت فولاد باید در قالب سیاست‌های پویای صنعتی در نظر گرفته شود و در این راستا دولت‌ها موظفند در حین وضع سیاست‌های کاهش کربن، اثرات آنها را در وضعیت صنعت فولاد مد نظر قرار دهند.

صنعت فولاد با تأمین کالاهای اساسی، ایجاد اشتغال، سود آوری و ایجاد بستر سرمایه‌گذاری، عامل تعیین کننده‌ای در توفیق اقتصادی به شمار می‌آید. عدم اتحاد و همبستگی بین نهادهای دولتی در خصوص تعیین استراتژی‌های بلند مدت و آینده نگرانه در خصوص فولاد، منجر به وضع مقررات مخرب در کوتاه مدت شده و آسیب‌های جدی به فرایند توسعه صنعت فولاد وارد خواهد نمود.

دوم، صنعت فولاد به شدت انرژی بر و آلاینده است ولی در عین حال در زمینه کاهش نشر CO_2 در میان سایر بخش‌های صنایع تولیدی بسیار رقابتی عمل کرده است. با اینحال نابرابری حاصل از مکانیزم قیمت‌گذاری جرایم کربن می‌تواند شرایط منصفانه برای رقابت را دچار اختلال کند.

به نقل از انجمن OECD[1] : "قیمت‌گذاری جرایم کربن بطور مستقیم یا غیرمستقیم می‌تواند تبعات متضاد گسترده‌ای را در بر داشته باشد که خود متضمن نزاع در این حوزه است. مرتفع نمودن این معضل، به عزم و خلاقیت دولت‌ها برای رسیدن به سطح مناسبی از قوه داوری بین بهره‌وری اقتصادی و پایداری سیاسی-اجتماعی در سیاست‌های محیط زیستی نیاز دارد."

از آنجائیکه ۳۱٪ فولاد در سطح بین المللی تجارت می‌شود، سیاست‌ها باید شرایطی یکنواخت را ترویج کنند تا اطمینان حاصل شود که شرکت‌های فولادی در یک منطقه در معرض آسیب‌های ناشی از تولید کنندگان فولاد مناطق دیگر و یا مواد رقابتی قرار نمی‌گیرند. علاوه بر این، اگر این مکانیزم‌ها با توجه به پیشرفت‌های فرآیند تولید و رفتار مصرف کننده موفق باشند، نباید به تغییر مکان تولید فولاد منجر شوند. وجود یک میدان رقابت در سطح جهانی و بکارگیری روش‌هایی جامع مبتنی بر شرایط بازار، شرایط لازم برای تضمین رفتار منصفانه در ارتباط با مفاهیم مالی و تجاری در طول زنجیره ارزش را فراهم می‌سازد.

سوم، رویکرد چرخه حیات ابزار مهمی برای سیاست‌های زیست محیطی آینده است.

دولت‌ها باید هنگام ایجاد مقررات جدید، چرخه حیات کامل یک محصول را مورد توجه قرار دهند. فقط با انجام این کار، تاثیر واقعی هر مرحله از حیات یک محصول را می‌توان محاسبه کرد و به طور موثر مورد توجه قرار داد. امروزه اغلب مقررات بدون در نظر گرفتن چرخه حیات و تنها بر فاز تولید یا مرحله استفاده از محصول معطوف شده‌اند که منجر به انتخاب مواد نامناسب می شود. در نظر گرفتن چرخه حیات، به ایجاد چارچوب قابل اعتماد و قابل پیش بینی برای سیاست‌های انرژی و همچنین سیاست‌های زیست محیطی کمک می‌کند.

چهارم، دولت ها باید رویکرد اقتصاد دورانی[2] را که منجر به طراحی نوآورانه، کاهش میزان مواد مصرفی، تشویق به استفاده مجدد، بازیافت مواد و ضایعات کم می‌شود، ترویج و تشویق کنند.

دولت های سراسر جهان در سطوح ملی و منطقه‌ای باید اولویت بندی جمع آوری و بازیافت محصولات فولادی را که در پایان دوره حیات خود هستند تعیین کنند. این تصمیم گیری باید برای مواد دیگر نیز اجرا شود. سیاست‌گذاری باید بگونه‌ای باشد که استفاده از موادی که قابلیت بازیافت کامل ندارند و نهایتاً به زباله تبدیل می‌شوند گسترش پیدا نکند.

در نهایت، توسعه آخرین دستاوردهای تکنولوژی در فولادسازی و بکارگیری آنها باید حفظ و تسریع گردد که این امر مستلزم تحمیل بار مالی بر دوش دولت و بخش خصوصی است.

کاهش ریسک شکست در تحقیق، توسعه و پیاده‌سازی تکنولوژی‌های جدید در طولانی مدت، به مشارکت بین صنعت فولاد و دولت‌های ملی و منطقه‌ای نیاز دارد. با در نظر گرفتن نیاز به آخرین دستاوردهای تکنولوژی در خصوص استفاده مجدد از CO_2 و منافع بالقوه‌ای که این امر برای جامعه به همراه دارد، سیاست گذاری‌ها باید تأمین بودجه برای تحقیقات معطوف به محیط زیست را تسهیل کنند. هر توافقنامه محیط زیستی در آینده باید مقررات مربوط به انتقال تکنولوژی، مکانیزم مدیریت ریسک آب و هوا و تأمین بودجه بین المللی را در بر داشته باشد.

فولاد در اقتصاد دورانی

در مدل اقتصاد خطی هر محصول از ماده خام ساخته شده و پس از استفاده دور ریز می‌شود. در مدل اقتصاد دورانی هر محصول پس از استفاده می‌تواند برای کاربردی متفاوت قابلیت استفاده مجدد پیدا کند یا تعمیر شده و

1- Organization for Economic Cooperation and Development
2- Circular Economy

شکل ۱- مزایای اقتصاد دورانی

برای همان کاربرد قبلی قابلیت استفاده مجدد پیدا کند و یا می‌تواند در نهایت بازیافت شود. مفهوم اقتصاد دورانی بر پایه ارتباط بین عوامل زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی استوار بوده و رویکرد چرخه حیات دارد. فولاد در یک اقتصاد دورانی سازمان یافته دارای مزایای قابل توجهی نسبت به دیگر مواد رقیب است. چهار کلید واژه شامل کاهش[1]، استفاده مجدد[2]، بازتولید[3] و بازیافت[4] این مزایا را تشریح می‌کنند (شکل ۱). البته در این زمینه چالش‌هایی نیز وجود دارد.

- بازیافت

استفاده از ضایعات فولادی باعث کاهش انتشار کربن از چرخه حیات فولاد می شود. فولاد یک ماده منحصر به فرد است که به طور مداوم بدون از دست دادن خواص یا عملکرد قابلیت بازیافت دارد. این امر، همراه با سابقه‌ای طولانی از تلاش های قابل توجه برای افزایش میزان بازیافت، منجر به پیشرو بودن آمار بازیافت فولاد در دنیا شده است. مثال بارز این مدعا آمار بازیافت خودرو و قوطی‌های فولادی در دنیا است. محدودیتی که در این زمینه وجود دارد در دسترس نبودن قراضه فولادی به دلیل عمر طولانی محصولات ساخته شده از این ماده است. در این خصوص می‌توان به پل‌ها و دیگر سازه‌های فولادی اشاره نمود. عامل دیگری که در این رابطه تأثیر گذار است کاهش میزان ضایعات خط تولید محصول نهایی است که در حال حاضر ۵۰٪ کل قراضه‌های فولادی را به خود اختصاص داده است. سیاست گذاری‌ها باید طوری باشد که محصولات فولادی به‌گونه‌ای طراحی شوند که قابلیت تفکیک قطعات و بازیافت داشته باشند.

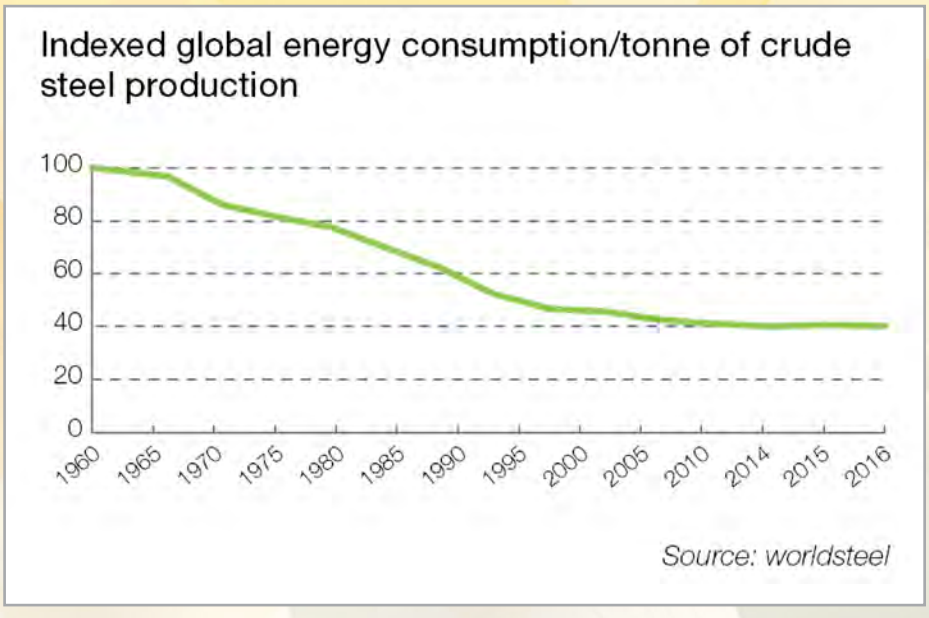
- استفاده از محصولات جانبی

تولید فولاد منجر به تولید محصولات جانبی می‌شود که در صورت استفاده از آنها به عنوان منابع جایگزین در صنایع دیگر استفاده شود میزان نشر CO_2 به طرز چشمگیری کاهش خواهد یافت. در این رابطه می‌توان به کاربرد سرباره کوره بلند در سیمان سازی و یا کاربرد سرباره فولادسازی به عنوان مصالح عمرانی اشاره نمود که نقش به‌سزایی در کاهش نشر CO_2 و اثرات مخرب زیست محیطی ایفا می‌کنند. قطعاً استفاده ترجیحی از محصولات جانبی به حفظ منابع طبیعی کمک شایانی می‌نماید و در این خصوص استانداردها باید اطمینان حاصل کنند کلیه موادی که پتانسیل استفاده در یک کاربرد مشخص را دارند می‌توانند در شرایط برابر با هم رقابت کنند.

- بازده انرژی

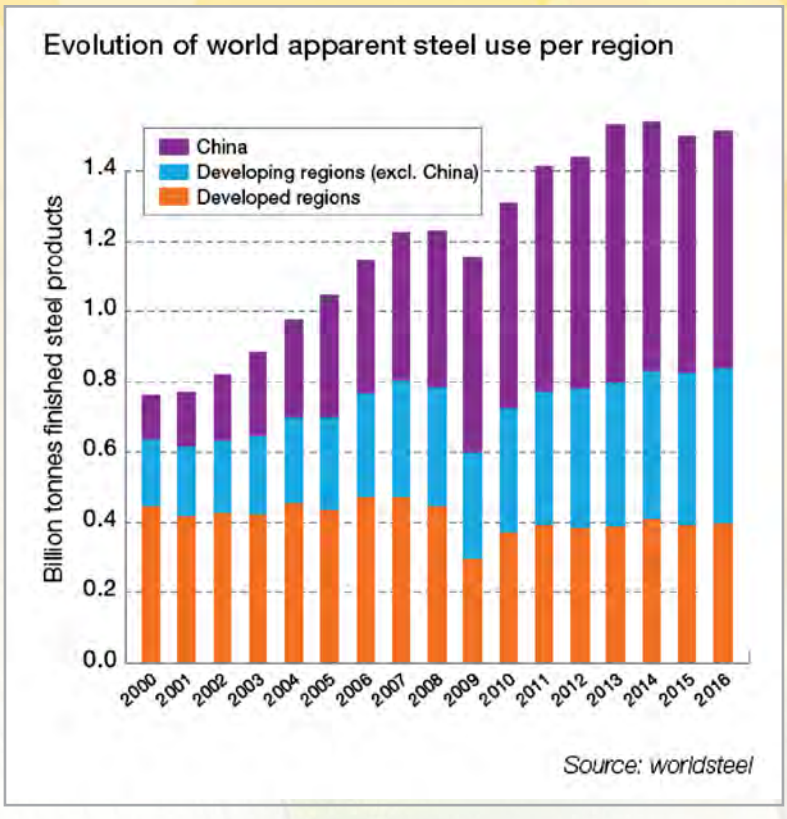
در ۵۰ سال گذشته، صنعت فولاد مصرف انرژی خود را به ازای هر تن فولاد تولید شده حدود ۶۰ درصد کاهش داده است (شکل ۲). انرژی‌های تلف شده نیز بازیابی شده و به طور موثر استفاده می‌شوند. با این حال، علیرغم

1- Reduce
2- Reuse
3- Remanufacture
4- Recycle



شکل ۲- روند مصرف انرژی در صنعت تولید فولاد

پیشرفت چشمگیر در بهره‌وری انرژی، برآورد شده که بر اساس تکنولوژی‌های موجود ظرفیت چندانی برای بهبود بهره‌وری انرژی در آینده وجود ندارد. بر اساس نتایج مطالعه‌ای که اخیراً صورت گرفته است متوسط مصرف انرژی برای تولید یک تن فولاد خام حدود ۲۰ GJ است که می‌توان آن را حداکثر بین ۱۵ تا ۲۰ درصد بهبود داد. جالب است کارخانجاتی که کمترین مصرف انرژی را دارند لزوماً مجهز به تجهیزات پیشرفته نیستند؛ بلکه عملکرد بهینه آنها به علت دانش بهره‌برداری و سیستم های نرم افزاری بهینه است.



شکل ۳- روند میزان مصرف جهانی فولاد

- استفاده از فولاد نهایی شده

فولاد در بسیاری از مصارف و کاربردها عمر بسیار طولانی دارد و بر این اساس می‌تواند نقش مهمی در بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها، کارخانجات، ماشین آلات و حمل و نقل ایفا کند. میزان کاهش انتشار CO_2 هنگام استفاده از فولادهای گرید بالا در مصارف خاص، تا ۶ برابر بیشتر از کاهش نشر CO_2 حاصل از تولید خود فولاد پیشرفته است. به عنوان مثال، فولادهای با استحکام بالا وزن کامیون‌ها را کاهش می‌دهند و آنها را قادر می‌سازند تا کالاهای بیشتری را برای همان میزان انتشار CO_2 در هر کیلومتر حمل کنند. همچنین فولادهای الکتریکی بهبود یافته ترانسفورماتورهای بسیار کارآمدتر و پربازده‌تری تولید می‌کنند و در نتیجه موتورها به طور قابل توجهی انرژی کمتری مصرف خواهند کرد. فولاد همچنین امکان بازیافت مواد دیگر را از طریق به‌کار گرفته شدن در ساخت تجهیزات بازیافت کننده فراهم می‌کند و در نتیجه نقش مهمی در اقتصاد دورانی ایفا می‌کند. نقش کلیدی دیگری که فولاد در اقتصاد دورانی دارد ارتباط نزدیک با مصرف کننده و ارتقاء طراحی و گرید فولاد است.

- رویکرد چرخه حیات

به منظور ادامه این تلاش‌ها و شناسایی تمام فرصت‌ها برای کاهش انتشار کربن از چرخه حیات فولاد، رویکردی کامل به مقوله چرخه حیات فولاد ضروری است. در این راستا کلیه انتشارات گازی در طول چرخه تولید محصول فولادی، همراه با میزان کاهش مصرف انرژی حاصل از به‌کارگیری فولادهای سبک‌تر و در عین حال با استحکام بالاتر، توأمان مد نظر قرار می‌گیرند. بازیافت پذیری ذاتی فولاد باید حتی المقدور در تصمیم-گیری‌های مربوط به انتخاب مواد در نظر گرفته شود. علاوه بر این باید در نظر داشت که این ویژگی فولاد مانع از تجمع غیرضروری ضایعات فولادی در تأسیسات دفع زباله می‌شود. از دیدگاه چرخه حیات میزان آلایندگی ماده‌ای همچون فولاد در مقایسه با مواد با چگالی کمتر همچون آلومینیم یا فیبر کربن بسیار کمتر است؛ این امر نه تنها در بخش تولید خودنمایی می‌کند بلکه از منظر بازیافت پذیری فولاد بدون تغییر در خواص آن نیز قابل بررسی است. حمایت دولت‌ها از طرح‌های ارزیابی چرخه حیات ضروری است. سیاست‌گذاری‌هایی که هدفشان کاهش آلایندگی ناشی از تولید مواد است باید به‌گونه‌ای باشند که مصرف‌کنندگان و طراحان محصول نهایی بتوانند در فضایی رقابتی از تبعات انتخاب ماده‌ای که انجام می‌دهند آگاه شوند.

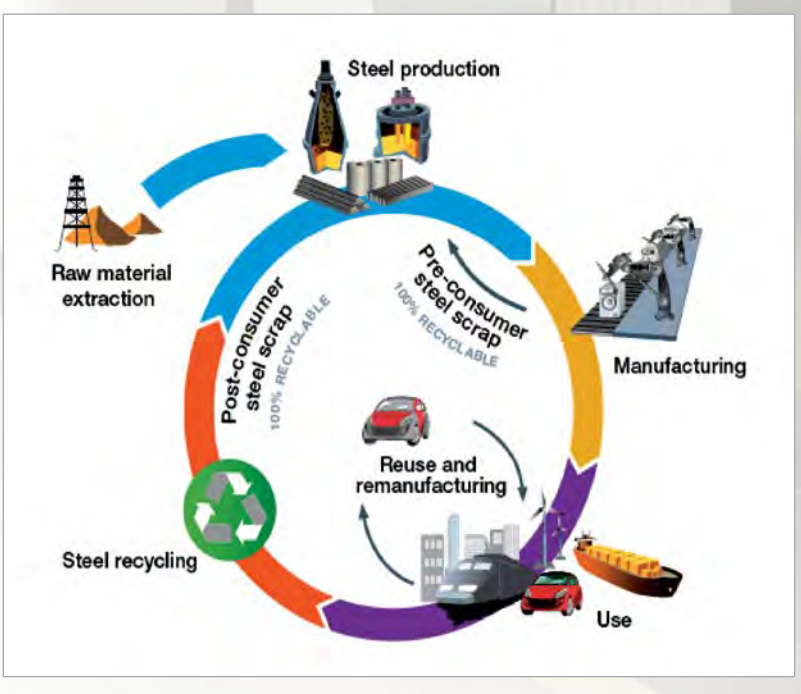
فعالیت‌های صنعت فولاد در جهان

صنایع فولاد در جهان در حال انجام فعالیت‌هایی در راستای کاهش نشر CO_2 به شرح زیر هستند.

- توسعه آخرین دستاوردهای تکنولوژی

کاهش نشر CO_2 یا حتی ثابت نگه داشتن میزان آن مستلزم توسعه و معرفی تکنولوژی‌های نوین در صنعت فولادسازی است که در آن رد کمتری از کربن مشاهده شده و شامل استفاده مجدد از CO_2 باشد. این رویکرد ممکن است موفق باشد و به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت فولاد کمک کند. به‌عنوان مثال: در اروپا، HIsarna ثابت کرده که در مقیاس آزمایشی کارخانه موفقی است. پروژه HIsarna از طریق ترکیبی از موسسات دولتی و شرکای کنسرسیوم فولاد اروپا تامین مالی می شود. در ژاپن، یکی دیگر از برنامه های تحقیق و توسعه با نام "COURSE50" که توسط دولت پشتیبانی می شود، در حال انتقال از مرحله آزمایشی به مقیاس نیمه صنعتی است.

در آمریکای شمالی، فعالیت‌هایی در قالب برنامه‌ای با عنوان آخرین دستاوردهای تکنولوژی کاهش CO_2 زیر نظر مؤسسه آهن و فولاد آمریکا در حال انجام است. این برنامه که توسط وزارت انرژی ایالات متحده حمایت مالی می‌شود، یک فرایند آهن‌سازی نوآورانه را در دستور کار قرار داده است. علاوه بر این، کشورهای منطقه اقیانوس آرام طی اجلاسی توافق کردند تا یک کتاب مرجع با عنوان "تکنولوژی‌های پاک پیشرفته"(SOACT)[1] برای به اشتراک گذاری فرایندهای فولادسازی و تکنیک‌های افزایش بازدهی انرژی به چاپ برسانند. در مناطق دیگر دنیا برنامه‌های دیگری در این رابطه در حال اجراست که از آن جمله می‌توان به برنامه POSCO در کره و برنامه



شکل ۴- چرخه حیات فولاد

1- State of the Art Clean Technologies

شـرکت China Steel در تایـوان اشـاره نمـود.
تکنولوژی‌هـای جـذب و ذخیره‌سـازی کربـن هنـوز بـه آن درجـه از رشـد و تکامـل نرسـیده‌اند کـه بخواهنـد بـه عنـوان یـک گزینـه جـدی و قابـل قبـول بـرای صنایـع آهـن و فـولاد مطـرح باشـند و همچنـان بـه حمایت‌هـای دولتـی و بخـش خصوصـی نیازمندنـد.

- پایگاه داده LCI[1]

در طـول ۲۰ سـال گذشـته، انجمـن worldSteel اقـدام بـه جمـع آوری و انتشـار بزرگ‌تریـن و معتبرتریـن پایـگاه داده در خصـوص چرخـه حیـات طیـف گسـترده‌ای از محصـولات فـولادی بـر اسـاس داده‌هـای واقعـی دریافـت شـده از اعضـای آن در سراسـر جهـان نمـوده اسـت. ایـن پایـگاه داده در سـال ۲۰۱۷ بـرای بیـش از ۱۶ محصـول فـولادی به روز شـده اسـت و بـه صـورت داده‌هـای جهانـی و منطقـه‌ای قابـل دسـترس اسـت. ایـن پایـگاه داده بـه طـور گسـترده توسـط مشـتریان فـولاد، دانشـگاهیان و سـایر ذینفعـان مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیـرد.

- به اشتراک گذاشتن تکنولوژی

انجمـن WorldSteel بـا همـکاری شـرکت‌های عضـو، در مـورد موضوعاتـی کـه صنعـت فـولاد را تحـت تأثیـر قـرار می‌دهنـد گزارش‌هـای فنـی تولیـد می‌کنـد. بسـیاری از ایـن گزارش‌هـا بـه وسـیله سیسـتم‌های اشـتراک‌گذاری آنلایـن و سیسـتم‌های سـنجش از راه دور بـه روز می‌شـوند و به‌طـور موثـر بـه بهبـود عملکـرد زیسـت محیطـی کارخانه‌هـای فولاد در سراسـر جهـان کمـک می‌کننـد. نمونه‌هـای اخیـر شـامل کیفیـت هـوا، محصـولات جانبـی، مصـرف انـرژی، نگهـداری و قابلیـت اطمینـان، مـواد خـام و مدیریـت آب اسـت.

- برنامه‌های توسعه بازار

انجمـن WorldSteel دارای تعـدادی برنامـه توسـعه بـازار اسـت کـه بیشـتر روی بهبود بهـره‌وری مصـرف انـرژی در بخش‌های مصـرف کننـده فـولاد تمرکـز دارد. یکـی از زیـر مجموعه‌هـای ایـن انجمـن بـا نـام WorldAutoSteel برنامه‌هایـی بـرای بهینـه سـازی مصـرف فـولاد در خودروهـای نسـل آینـده، یعنـی خودروهـای هیبریـدی و الکتریکـی دارد.

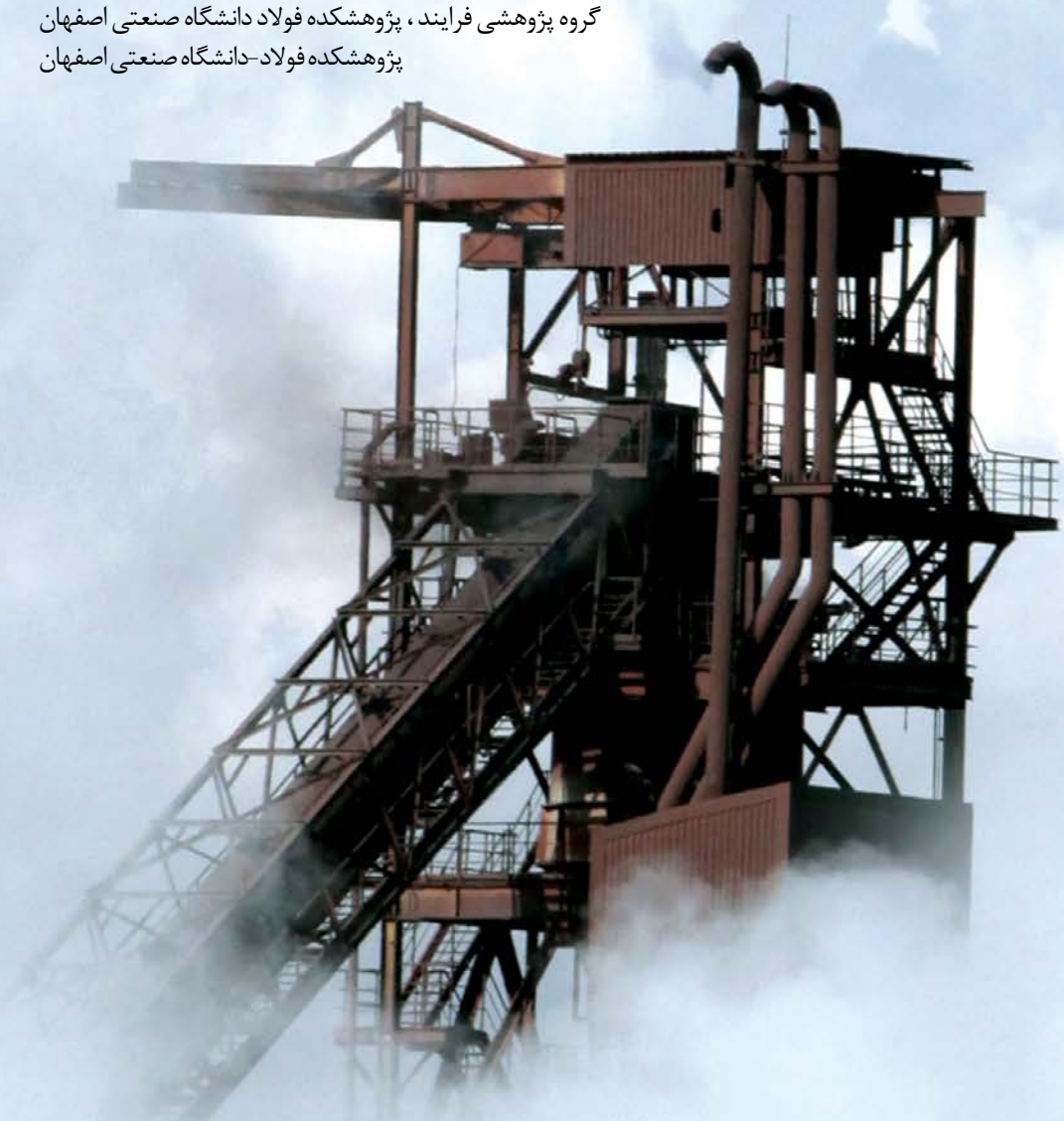
- برنامه تشخیص اقدامات اقلیمی

اعضـای انجمـن WorldSteel در خصـوص روش محاسـبه میزان CO_2 منتشـر شـده در کارخانجات فولادسـازی به توافقی دسـت پیـدا کردنـد کـه پـس از آن بـه یـک اسـتاندارد بین‌المللـی تبدیـل شـد (ISO14404:2013). هـر سـاله شـرکت‌های عضـو و غیـر عضـو ایـن انجمـن می‌تواننـد توسـط ایـن روش و در قالـب برنامـه تشـخیص اقدامـات اقلیمـی اقـدام بـه تهیـه گـزارش از وضعیـت انتشـار گاز CO_2 در کارخانه‌هـای خـود نماینـد. بدیـن وسـیله شـرکت‌ها موقعیـت خـود را نسـبت بـه دیگـر تولیدکننـدگان مـورد سـنجش قـرار داده و اقدامـات اصلاحـی مـورد نظرشـان را اولویـت بنـدی می‌کننـد. ایـن برنامـه در حـال حاضـر بـا اقبـال خوبـی از طـرف صنایـع فولاد روبـرو بـوده و اطلاعـات جمـع آوری شـده در پایگاه‌هـای اطلاعاتـی عمومـی و وبسـایت‌ها مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیرد.

1- Life Cycle Inventory

بررسی جامع آخرین دستاوردهای تکنولوژی در زمینه کاهش مصرف انرژی و انتشار CO_2 در راستای تولید و توسعه پایدار صنعت آهن و فولاد

گروه پژوهشی فرایند ، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان
پژوهشکده فولاد-دانشگاه صنعتی اصفهان



۱) چکیده

صنعت آهن و فولاد بزرگترین مصرف کننده انرژی در میان دیگر صنایع تولیدی در جهان به شمار می‌آید. ۴ تا ۵ درصد کل گاز CO_2 منتشر شده در جهان با منشأ انسانی مربوط به این صنعت است. با توجه به رشد روزافزون تقاضا برای محصولات فولادی در جهان، مصرف سوخت‌های فسیلی توسط این صنعت و به تبع آن نشر CO_2 افزایش پیدا خواهد کرد. بنابراین انگیزه زیادی برای توسعه و بکارگیری تکنولوژی‌های پر بازده و کم کربن در صنعت آهن و فولاد وجود دارد. توسعه روش‌های بازیافت حرارتی به همراه استفاده از تکنولوژی‌های جمع آوری و ذخیره سازی کربن (CCS) راهکاری مؤثر در کاهش نشر CO_2 به حساب می‌آیند. هدف از این مقاله مروری جامع بر روی برنامه‌های صنایع آهن و فولاد دنیا به منظور کاهش کربن و معرفی آخرین دستاوردهای تکنولوژی در خصوص کاهش نشر CO_2 است. همچنین در خصوص انتخاب مناسب‌ترین تکنولوژی، موانع و چالش‌های پیش رو و در نهایت مراحل توسعه و بکارگیری آن، مباحثی مطرح شده است. در نهایت به این نتیجه خواهیم رسید که کماکان عوامل متعددی منجر به ایجاد محدودیت در استفاده از زیست توده‌ها (سوخت های زیستی) برای کاهش آلایندگی در صنعت آهن و فولاد می‌شوند و در حال حاضر استفاده از تکنولوژی‌های CCS در مجتمع‌های فولاد بر پایه زغال سنگ، بهترین روش برای تولید پاک و پایدار فولاد است.

۲) مقدمه

صنایع آهن وفولاد از پر مصرف ترین صنایع در خصوص انرژی و آلاینده ترین در زمینه انتشار گازهای گلخانه ای به شمار می‌آیند. فرایندهای تولید آهن و فولاد کماکان در سطح گسترده‌ای وابسته به زغال سنگ و به تبع آن سوخت‌های فسیلی هستند، بنابراین مقادیر قابل توجهی گاز دی اکسید کربن تولید می‌کنند [۱و۲]. مصرف انرژی در صنایع آهن و فولاد در جهان حدود ۶۱۶ Mtoe (۲۵/۸ EJ) و میزان نشر دی اکسید کربن آن ۲/۳ Gt (در سال ۲۰۰۷) برآورد می‌شود [۳]. بر این اساس صنعت آهن و فولاد رتبه دوم صنایع مختلف را در خصوص مصرف انرژی در جهان داراست. به نقل از IPCC [۱]، صنایع فولاد بین ۴ تا ۵ درصد نشر جهانی دی اکسید کربن را به خود اختصاص می‌دهند. از طرف دیگر طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی، حدود ۴۰٪ کل دی اکسید کربن منتشر شده در جهان متعلق به صنایع تولیدی است که در این میان صنایع آهن و فولاد بزرگترین سهم (حدود ۲۷٪) را به خود اختصاص داده است [۵].

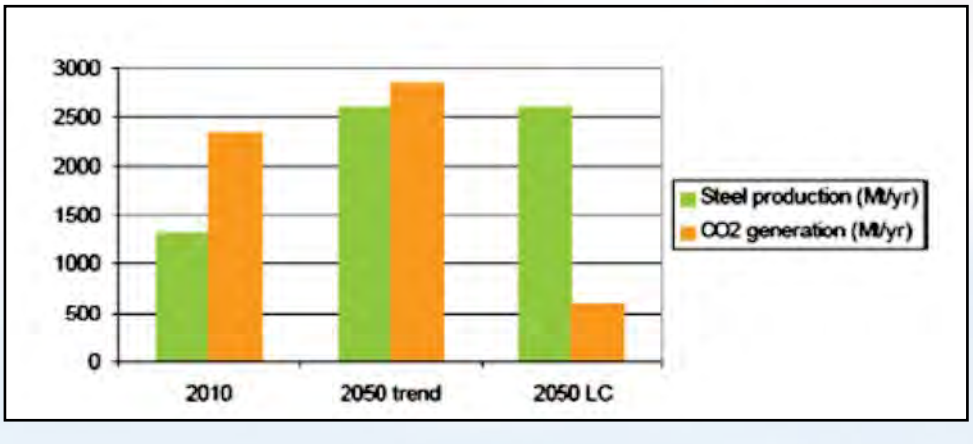
در عین حال فولاد یکی از مهمترین و پرکاربردترین فلزات در دنیا محسوب می‌گردد به قسمی که نرخ تولید آن طی ۱۰ سال از ۸۵۰ Mt در سال ۲۰۰۰ به ۱۵۳۷ Mt در سال ۲۰۱۱ رسیده است. این در حالیست که این روند از سال ۲۰۰۲ به بعد رشد شتابزده تری داشته است [۶و۷]. با توجه به تولید ۱۶۰۶ Mt فولاد در سال ۲۰۱۳، نرخ متوسط افزایش تولید سالیانه فولاد را می‌توان حدود ۵٪ برآورد نمود [۸و۹].

با توجه به مسائل مطرح شده و همچنین با در نظر گرفتن پدیده گرمایش زمین و معضلات مرتبط با تغییرات آب و هوایی، کاهش مؤثر نشر دی اکسید کربن در صنایع آهن و فولاد از اهمیت استراتژیک و مهمی برخوردار است. دستیابی به این مهم از سه حوزه امکان پذیر است: کاهش تقاضا برای فولاد، افزایش بازیافت فولاد و نوآوری در تکنولوژی‌های تولید فولاد [۱۰].رشد پایدار مصرف فولاد در جهان و همچنین کمبود قراضه با کیفیت و ارزان، تمایل بیشتر به فعالیت در حوزه سوم یعنی دستیابی به تکنولوژی‌های جدید برای تولید فولاد پاک را توجیه می‌کند [۱۱و۱۲].

در یک دهه گذشته تحقیقات متعددی در قالب برنامه‌هایی ملقب به "آخرین دستاوردهای تکنولوژی برای کاهش دی اکسید کربن" (ULCOS، AISI، POSCO، COURSE 50)[۲] و غیره) در حال انجام بوده است [۱۴]. هدف این برنامه‌ها تولید پایدار و پربازده آهن و فولاد بدون کربن و بصورت پاک است. در این برنامه‌ها راه کارهایی همچون بازیافت گاز خروجی کوره بلند (TGR-BF)، فرایندهای احیای مستقیم و کوره‌های قوس الکتریکی، الکترولیز آهن (Electrowinning) و همچنین استفاده از هیدروژن و الکتریسیته به عنوان عوامل احیا، مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته‌اند [۱۵،۱۶].

برنامه ULCOS[۳] یا همان فولادسازی با نشر CO_2 بسیار کم، کنسرسیومی است بین ۴۸ شرکت و سازمان مرتبط با صنعت فولاد در اتحادیه اروپا. در این برنامه کاهش نشر CO_2 از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰ پیش بینی و اقدامات مورد نظر برای دستیابی به آن طرح ریزی شده است. در سال ۲۰۱۰ نشر CO_2 در جهان به ازای هر تن فولاد تولید شده حدود ۱/۸ تن برآورد شده است. در سال ۲۰۵۰ در صورت استفاده از بهترین تکنولوژی‌های جدید قابل دسترس (BATs)[۴] تنها ۱۵٪ (۱/۱ ton CO_2/ton crude steel) کاهش نشر CO_2 خواهیم داشت. ولی در صورتی که برنامه ULCOS موفق شود تکنولوژی‌های کاهش نشر CO_2 را تجاری سازی نموده و در دسترس صنایع قرار دهد و همچنین سیاست گذاری‌های صحیحی در جهت بکارگیری آنها اتخاذ گردد شاهد کاهش نشر CO_2 به حدود ۰/۲ ton CO_2/ton crude steel تا سال ۲۰۵۰ خواهیم بود (شکل ۱) [۱۷ تا ۲۰].

در موافقت نامه همکاری آسیا- اقیانوسیه در زمینه توسعه پاکسازی محیط زیست[۵] نیز برنامه‌ریزی برای

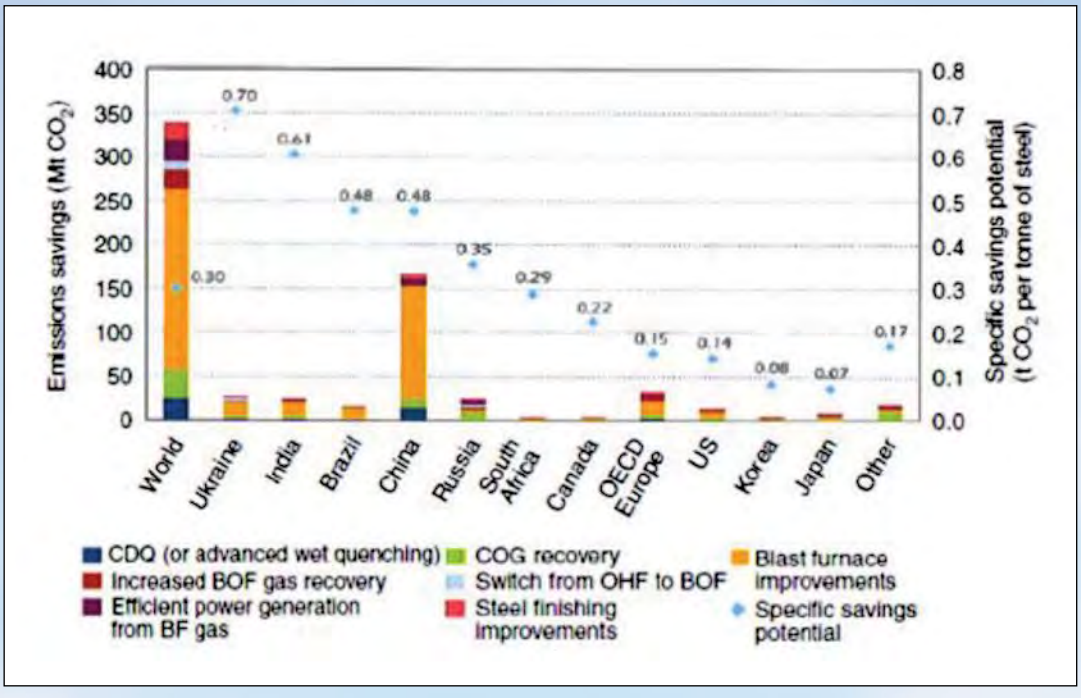


شکل ۱. پیش بینی نشر CO_2 در صنایع آهن و فولاد [۲۰].

1- Intergovernmental Panel on Climate Change
2- CO_2 Breakthrough Technologies
3- Ultra
4- Best Available Technologies
5- Asia-Pacific

کاهش ۱/۲۷ میلیون تن CO_2 در سال به کمک جایگزین کردن BATs در صنایع آهن و فولاد، صورت گرفته است. همچنین آژانس بین المللی انرژی تخمین زده است با انتقال BATs به صنایع آهن و فولاد، نشر CO_2 تا ۳/۴ تن در سال کاهش پیدا می‌کند (شکل ۲) [۲۱و۲۲].

در این مقاله در ابتدا شرحی اجمالی از روشهای تولید آهن و فولاد ارائه شده، سپس میزان مصرف انرژی و نشر CO_2 در بخش‌های مختلف فرایند تولید مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش بعدی مرور جامعی در خصوص آخرین دستاوردهای تکنولوژی برای کاهش CO_2 در صنایع آهن و فولاد و جنبه‌های مرتبط با آن یعنی تکنولوژی‌های بازیابی انرژی حرارتی هدر رفته، تکنولوژی های جمع آوری و انبارش کربن[1] ، مدیریت مصرف آب تصفیه پساب و چالش‌های پیش رو، صورت گرفته است. در ادامه مطالعه مفهومی و تحلیلی در رابطه با انتخاب بهترین تکنولوژی کاهش نشر CO_2 ارائه شده و موانع و مراحل اجرایی کردن طرح‌ها مورد بحث قرار گرفته است.



شکل۲. پتانسیل کاهش CO_2 در سال ۲۰۰۵ بر اساس بهترین تکنولوژی‌های موجود [۲۱].

1- Carbon Capture and Storage (CCS)

۳) مصرف انرژی و نشر CO_2 در فرایندهای تولید آهن و فولاد

۲-۱) روش‌های تولید آهن و فولاد

مراحل مختلف فراوری فولاد عبارتند از: آهن سازی، فولادسازی اولیه و ثانویه، ریخته گری و نورد گرم. در ادامه فرایندهای دیگری همچون نورد سرد، فورج، ماشین‌کاری، پوشش دهی و عملیات حرارتی نیز بر روی فولاد انجام می‌شود که منجر به تولید محصول نهایی می‌شود. مواد اولیه مورد استفاده در صنایع فولاد عبارتند از: سنگ آهن، زغال سنگ، سنگ آهک و قراضه فولادی [۲۳].

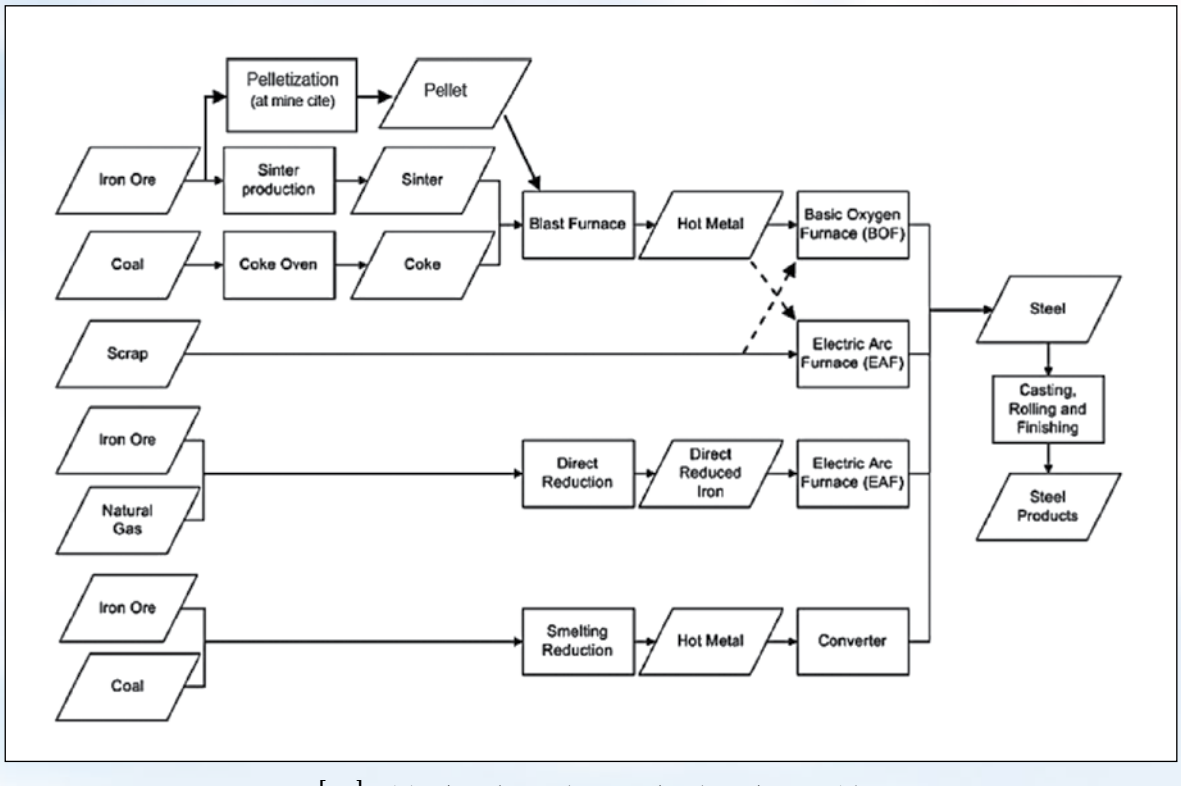
مسیرهای تولید آهن و فولاد به طور اجمالی در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. دو روش اصلی برای تولید فولاد وجود دارد: (۱) روش اولیه که در آن از مواد خام (سنگ آهن و زغال سنگ) برای تولید فولاد استفاده می‌شود، (۲) روش ثانویه که در آن از مواد فراوری شده (قراضه فولادی) برای این منظور استفاده می‌شود [۲۴].

رایج‌ترین فرایند تولید فولاد در مسیر اولیه، فرایند کوره بلند (BF)[1] به همراه کوره کنورتور(BOF)[2] است [۲۴]. حدود ۷۰٪ فولاد دنیا با این روش تولید می‌شود [۲۶]. در روش فولادسازی ثانویه از کوره‌های قوس الکتریکی (EAF)[3] برای ذوب قراضه‌های فولادی استفاده می‌شود. در واقع قراضه به عنوان مکمل آهن اسفنجی (DRI)[4] مورد استفاده قرار می‌گیرد و افزودنی‌های مختلفی همچون فرو آلیاژها برای رسیدن به ترکیب شیمیایی مورد نظر به آن اضافه می‌شود [۲۷]. حدود ۲۹٪ فولاد دنیا از روش EAF تولید می‌شود [۲۸]. البته فولادسازی با EAF در برخی کشورها از اقبال گسترده‌تری برخوردار است. به عنوان مثال ۶۱٪ تولید فولاد در ایالات متحده آمریکا و کل تولید فولاد در عربستان سعودی و ونزوئلا در سال ۲۰۱۰ با این روش صورت گرفته است [۱۷].

تکنولوژی دیگری در فولادسازی وجود دارد به نام کوره زیمنس- مارتین یا کوره دهان باز (OHF)[5]. این فرایند مصرف انرژی بالایی دارد، به لحاظ زیست محیطی بسیار آلاینده است و راندمان اقتصادی پایینی دارد. این روش طی یک دهه گذشته تقریباً از دور خارج شده و تنها ۱٪ از تولید فولاد جهان را به خود اختصاص داده است [۲۴].

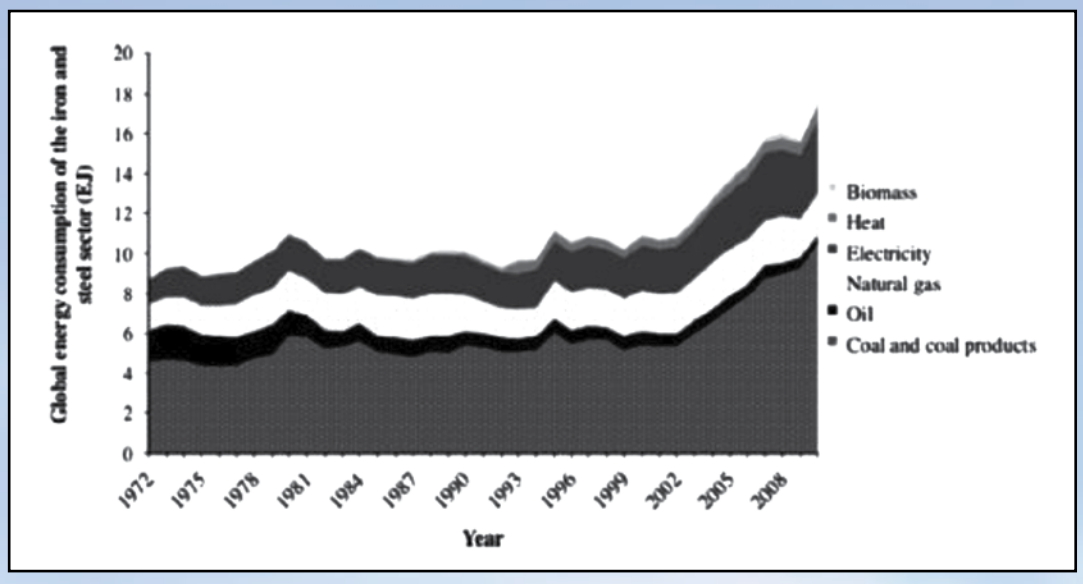
۲-۲) مصرف انرژی در تولید آهن و فولاد

تولید فولاد فرایندی انرژی بر و آلاینده است و همچنین به مقادیر عظیمی منابع طبیعی نیاز دارد. در سال ۲۰۱۰ کارخانجات آهن و فولاد حدود ۱۵٪ کل انرژی استفاده شده در صنایع را به خود اختصاص داده‌اند. این در حالیست که این آمار برای صنایع شیمیایی و پتروشیمی حدود ۱۳٪ و برای صنایع غیر فلزی حدود ۱۲٪ است [۲۹]. کل انرژی مصرف شده در صنایع به استثنای منابع نفتی ورودی به کارخانجات، ۱۱۴ EJ بوده است [۳۰]. در سال ۲۰۰۵ صنایع آهن و فولاد در ازای تولید ۱۱۴۴ Mt



شکل۳. نمودار جریان برای روش‌های مختلف تولید فولاد [۲۵].

1- Blast Furnace
2- Basic Oxygen Furnace
3- Electric Arc Furnace
4- Direct Reduced Iron
5- Open Hearth Furnace



شکل ۴. سهم سوخت‌های استفاده شده در صنعت آهن و فولاد از ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۰ [۲۹].

فولاد خام، ۵۶۰ Mtoe (۲۳/۴ EJ) انرژی مصرف کرده‌اند و ۱/۹۹ Gt گاز CO_2 تولید نموده‌اند [۱۷و۳۱]. تنها پس از دو سال در ازای تولید ۱۳۴۷ Mt فولاد خام، مصرف انرژی به ۶۱۶ Mtoe (۲۵/۸ EJ) و تولید گاز CO_2 به ۲/۳ Gt رسیده است [۳۲]. دلیل این حجم آلایندگی را فارق از تولید بالای فولاد، می‌توان در مصرف انرژی زیاد و وابستگی صنایع فولاد به زغال سنگ به عنوان منبع اصلی انرژی دانست.

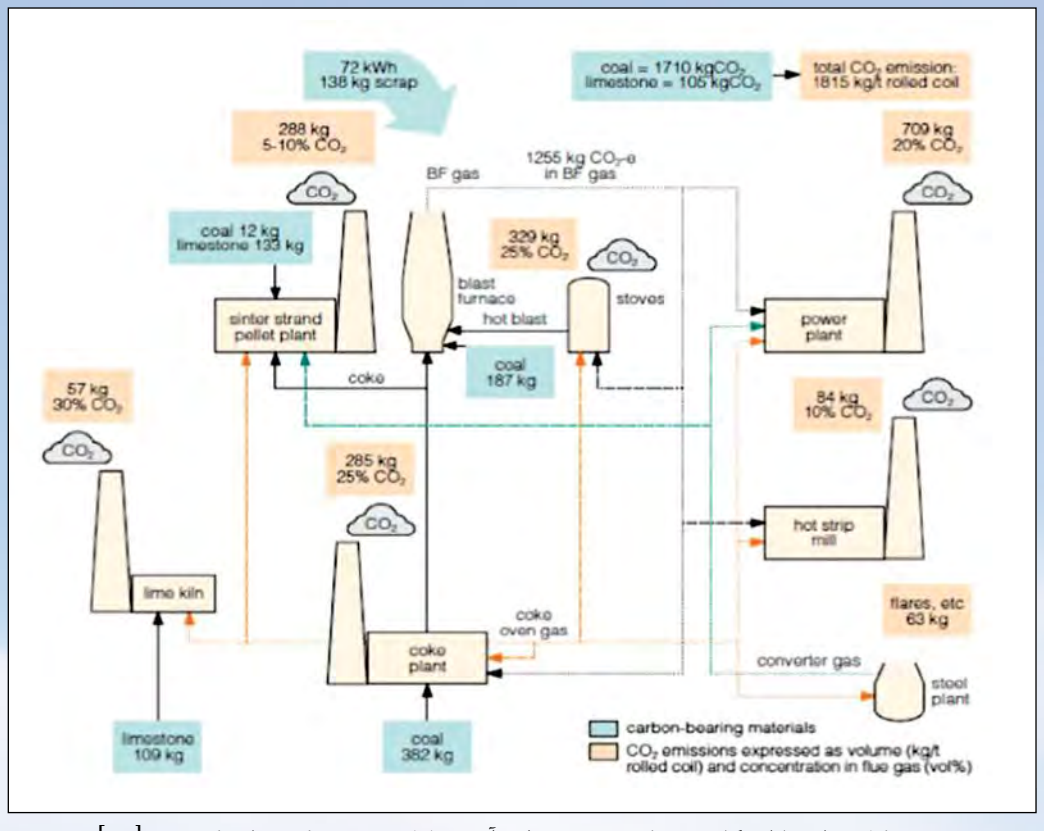
در شکل ۴ مصرف جهانی انرژی در حوزه آهن و فولاد از سال ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۰ به همراه انواع منابع سوختی مصرف شده نشان داده شده است. همانگونه که در نمودار دیده می‌شود تقاضای انرژی در فاصله سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ تقریباً دو برابر شده است.

۲-۳) نشر CO_2 از تولید آهن و فولاد

یک مجتمع آهن و فولاد (ISM)[1] مشتمل بر واحدهای تولیدی به هم پیوسته است و منابع متعدد نشر CO_2 (بالغ بر ۱۰ مورد) در آن وجود دارد [۲۰]. مقادیر عظیمی از CO_2 در حین واکنش احیا ($Fe_2O_3+3CO=2Fe+3CO_2$) در کوره بلند و همچنین طی واکنش‌های احتراق ($C+O_2=CO_2, CnHm+(n+m/4)O_2=nCO_2+(m/2)H_2O$) مواد کربن دار تولید می‌شود. از جمله مواد کربن دار می‌توان به نرمه کک یا گازهای حاوی کربن اشاره نمود. این مواد در گاز کوره بلند (B gas)، گاز کوره کک سازی (C gas)، واحد سینتر و پیش گرمکن یافت می‌شوند [۳۳]. شکل ۵ پروفیل نشر CO_2 در یک مجتمع BF/BOF را نشان می‌دهد. در این شکل میزان نشر CO_2 بر حسب کیلوگرم به ازای تولید هر تن کویل نورد شده فولادی در واحدهای مختلف و درصد حجمی CO_2 در خروجی استک‌ها نشان داده شده است. همچنین بالانس کربن ورودی توسط منابع ورودی اصلی (زغال سنگ و سنگ آهک) و خروجی از استک‌ها به سادگی نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود سهم زغال سنگ در نشر CO_2، ۱/۷۱t CO_2/t rolled coil و سهم سنگ آهک ۰/۱۲ t CO_2/t rolled coil است [۳۴].

منبع اصلی نشر CO_2 کوره بلند است به قسمی که

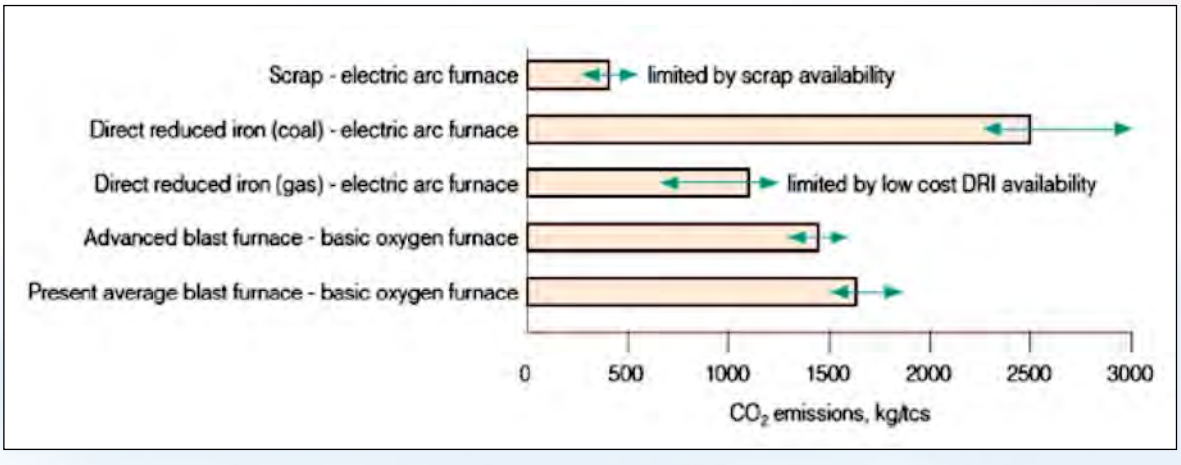
1- Integrated Iron and Steel Mill



شکل ۵. انتشارات گازی در یک مجتمع تولید آهن و فولاد به روش کوره بلند کنورتور [۳۵].

۶۹٪ از کل انتشارات گازی یک کارخانه آهن و فولاد را به خود اختصاص می‌دهد. دلیل این امر این است که اغلب واکنش‌های احیا در کوره بلند با مصرف انرژی بسیار بالایی انجام می‌شوند. ۲۵٪ از گاز خروجی کوره بلند را CO_2 تشکیل می‌دهد مابقی CO و نیتروژن هستند با درصدی تقریباً مشابه. غلظت CO_2 در گازهای خروجی از مابقی استک‌های کارخانه که جمعاً ۳۱٪ انتشارات گازی را به خود اختصاص می‌دهند در مقایسه با گاز خروجی از کوره بلند بسیار کمتر است (شکل ۵) [۳۰].

با اینحال همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است روش تولید DRI/EAF که احیای آن بر پایه زغال سنگ است، بیشترین انتشار CO_2 را در میان دیگر روش‌ها دارا است. این در حالیست که روش scrap/EAF نسبت به DRI/EAF و BF/BOF آلایندگی کمتری دارد. در شکل ۶ پیکان‌ها نشان دهنده میزان نشر CO_2 ناشی از فرایند تولید برق است به قسمی که طرف کم پیکان‌ها بیانگر تولید برق بدون تولید CO_2 و طرف زیاد پیکان‌ها بیانگر تولید برق در نیروگاه‌های پایه زغال سنگی هستند [۲۰].



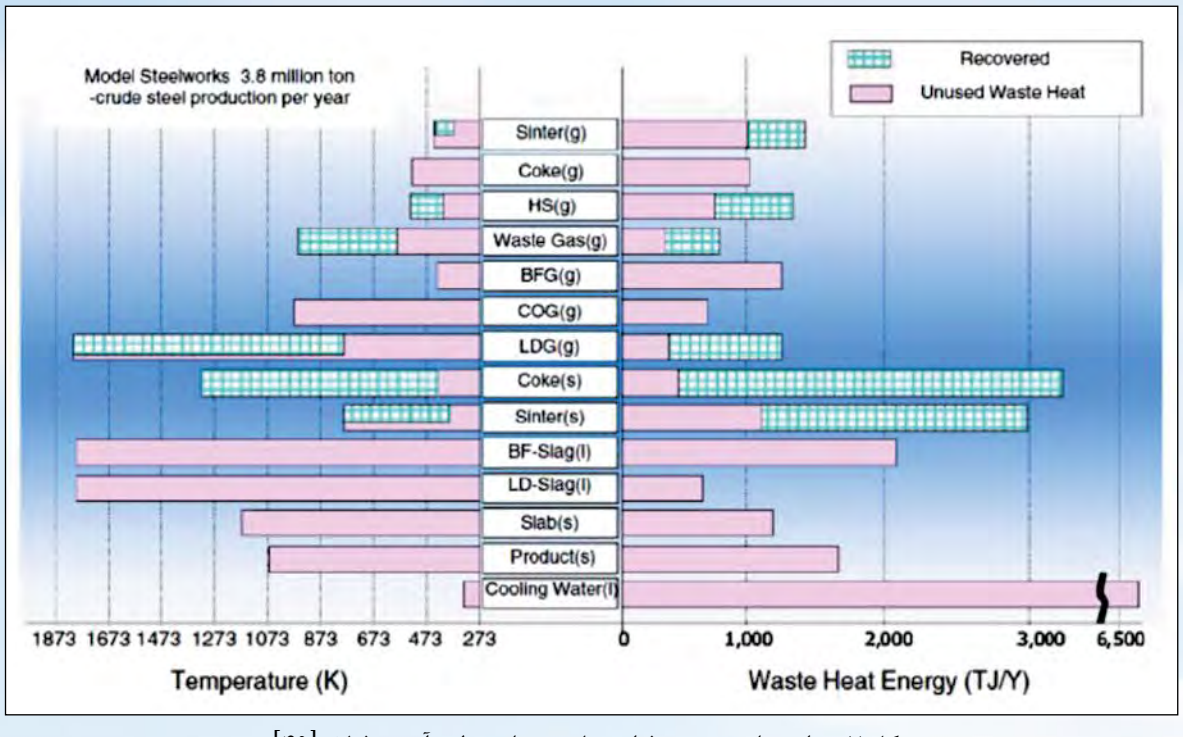
شکل ۶. نشر CO_2 به ازای هر تن فولاد خام در روش های تولید مختلف [۵].

استفاده از گاز طبیعی به عنوان منبع انرژی به جای زغال سنگ و کک در روش DRI/EAF می‌تواند آلایندگی ناشی از CO_2 را کاهش دهد. با استفاده از قراضه و سوخت‌های کم کربن مانند گاز طبیعی، کاهش نشر CO_2 به میزان ۳۰ تا ۸۰ درصد میسر خواهد بود به شرط آنکه قراضه و گاز طبیعی ارزان و در دسترس باشد. به عنوان مثال گاز طبیعی ارزان تنها در منطقه خاورمیانه قابل دسترس است [۵].

در خصوص جایگزین کردن سوخت‌های فسیلی با سوخت‌هایی که گازهای گلخانه‌ای کمتری تولید می‌کنند مطالعات مختلفی صورت گرفته است. به عنوان مثال می‌توان به استفاده از هیدروژن [۱۶، ۳۷ و ۴۸] و زیست توده‌هایی همچون زغال چوب یا گاز سنتز شده[1] [۳۹ تا ۴۱] به عنوان منبع انرژی در تولید آهن و فولاد اشاره نمود. از طرف دیگر در حال حاضر میزان استفاده از گاز طبیعی در دنیا حدود ۲۰٪ مصرف کل سوخت‌های فسیلی است و به نظر می‌رسد در آینده شاهد رشد مصرف آن در صنایع آهن و فولاد باشیم. با اینحال از نقطه نظر مسائل مربوط به تغییرات آب و هوا و گرمایش زمین باز هم با محدودیت‌هایی بر سر استفاده از این منبع انرژی روبرو هستیم. ابتدا باید در نظر داشت که احتراق گاز طبیعی در هر حال منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود هر چند مقدار آن در مقایسه با زغال سنگ کمتر است. بنابراین در صورتی که هدف، صرفاً کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد این جایگزینی مناسب است ولی در صورتی که اهداف سخت گیرانه تری مد نظر باشد، گاز طبیعی نقش مؤثری ایفا نمی‌کند و باید با تکنولوژی‌های دیگری مانند CCS تلفیق گردد. نکته دیگری که حائز اهمیت است مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی پایدار است. در این راستا در دسترس بودن منابع در مقیاس منطقه‌ای و قیمت جهانی انرژی در آینده همواره باید مد نظر قرار گیرد [۴۳].

۴) تکنولوژی‌های بازیافت انرژی حرارتی هدر رفته (WHER)[2]

در زمینه مصرف انرژی، صنعت آهن و فولاد رتبه دوم را در میان دیگر صنایع تولیدی به خود اختصاص داده است [۴۴]. تخمین زده می‌شود از کل انرژی ورودی به این صنعت حدود ۲۰ الی ۵۰ درصد آن به صورت انرژی حرارتی هدر می‌رود. این اتلاف انرژی در فرایندهای مختلف از طریق گازهای خروجی، آب خنک کننده، گرم شدن سطح تجهیزات ، سرباره مذاب و محصولات گرم اتفاق می‌افتد [۴۵و۴۶]. بزرگترین منابع اتلاف انرژی به صورت محصولات جانبی سرباره مذاب (۳۵٪) و گازهای خروجی یا اگزاست (۱۰٪) هستند [۴۷]. این انرژی حرارتی تلف شده به دلیل وجود تکنولوژی‌های ناکارآمد فعلی به درستی بازیابی نمی‌شود [۴۸]. شکل ۷ اتلاف حرارت در واحدهای مختلف یک کارخانه فولادسازی را نشان می‌دهد. در ادامه تکنولوژی‌های بازیافت انرژی در فرایندهای مختلف تولید فولاد تشریح می‌شود.



شکل ۷. حرارت تلف شده در فرایندهای مختلف تولید آهن و فولاد [۴۹].

1- Syngas
2- Waste Heat Energy Recovery

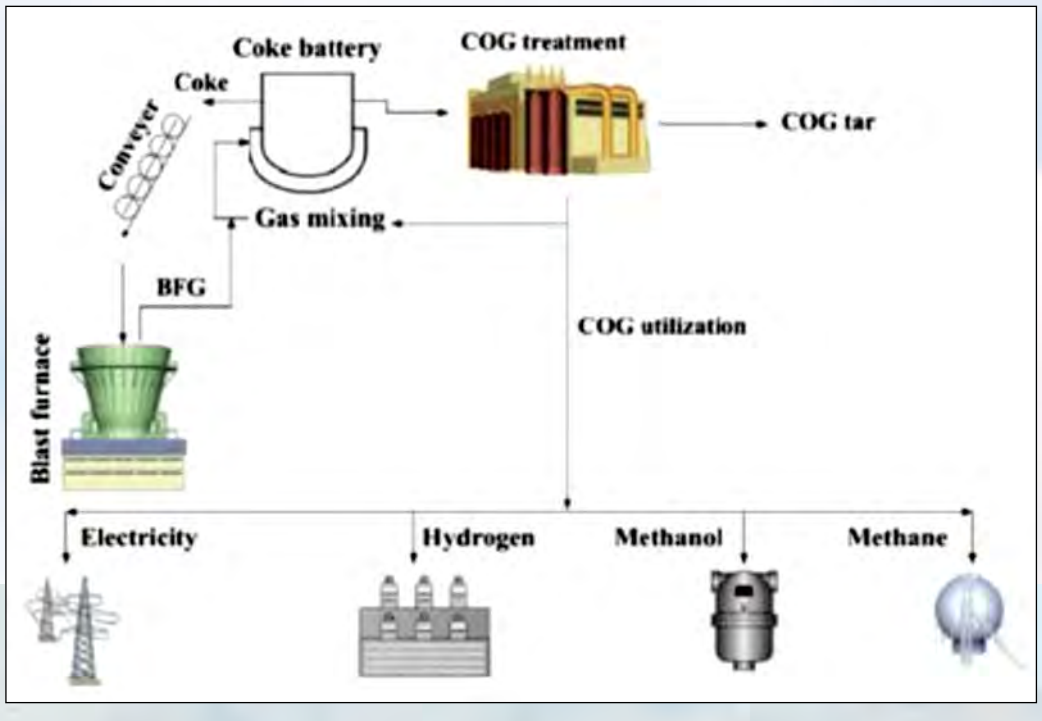
۳-۱) تکنولوژی‌های استفاده از گاز کوره کک سازی (COG)[1]

COG یا همان گاز کک محصول جانبی فرایند کک سازی است که عمدتاً از مواد فرار موجود در زغال سنگ تشکیل شده است [۹]. معمولاً ۱/۲۵ تا ۱/۶۵ تن زغال سنگ کک شونده برای تولید ۱ تن کک استفاده می‌شود و در این میان ۳۰۰ تا ۳۶۰ متر مکعب COG تولید می‌شود (6-8 GJ/t coke).

COG مخلوطی از ترکیبات مختلف مانند CO، CO_2، H_2، CH_4 و N_2 است [۵۰]. همچنین ۳۰٪ جرمی COG را قیر تشکیل می‌دهد. در صورت تبدیل کل COG محتوی قیر به اجزای سوختی سبک‌تر، تقاضای جهانی برای انرژی ۴/۱٪ تنزل خواهد یافت [۵۱]. بنابراین در راستای افزایش راندمان مصرف انرژی و به تبع آن کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای و تولید پایدار آهن و فولاد، باید توجه بیشتری به مفهوم بکارگیری COG داغ معطوف گردد. روش‌های مختلفی برای این منظور پیشنهاد شده است که بطور خلاصه عبارتند از: تولید انرژی، هیدروژن، متانول و متان (شکل ۸). گاز کک یکی از منابع غنی هیدروژن است. از طریق ریفرمرهای کاتالیستی و واکنش انتقال آب-گاز (WGSR)[2] هیدروژن موجود در COG بازیابی می‌شود [۵۲]. در صورت مجهز بودن کارخانجات فولادسازی به نیروگاه CHP، از COG و BFG می‌توان به عنوان منبع انرژی ورودی با ارزش حرارتی پایین استفاده نمود [۵۴].

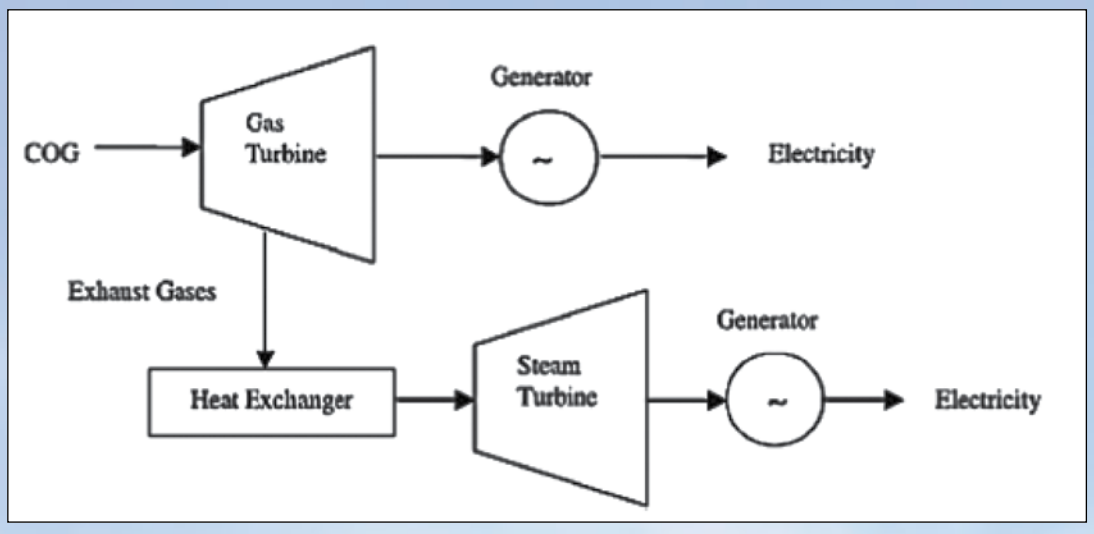
در سال ۲۰۰۶ اولین نمونه از سیستم CHP با ورودی COG در کارخانه Shandong Jinneng Coal Gasification Co. در کشور چین نصب شد. ظرفیت تولید برق این نیروگاه با مصرف $9700\ m^3/h$ گاز کک، حدود $1/6\ kWh/m^3$ است و همزمان $3/09\ kg$ بخار تولید می‌کند [۵۵]. در شکل ۹ فرایند نیروگاه CHP[3] با ورودی COG نشان داده شده است. راهکار مؤثر دیگر، استفاده از COG به عنوان عامل احیا در فرایند احیای مستقیم است. برای این منظور گاز کک ابتدا سولفور زدایی شده و پس از عبور از ریفرمر بخار آب وارد مدول احیا می‌شود (شکل ۱۰) [۵۲].

در ژاپن شرکت Ota Works فرایند کک سازی جدیدی را

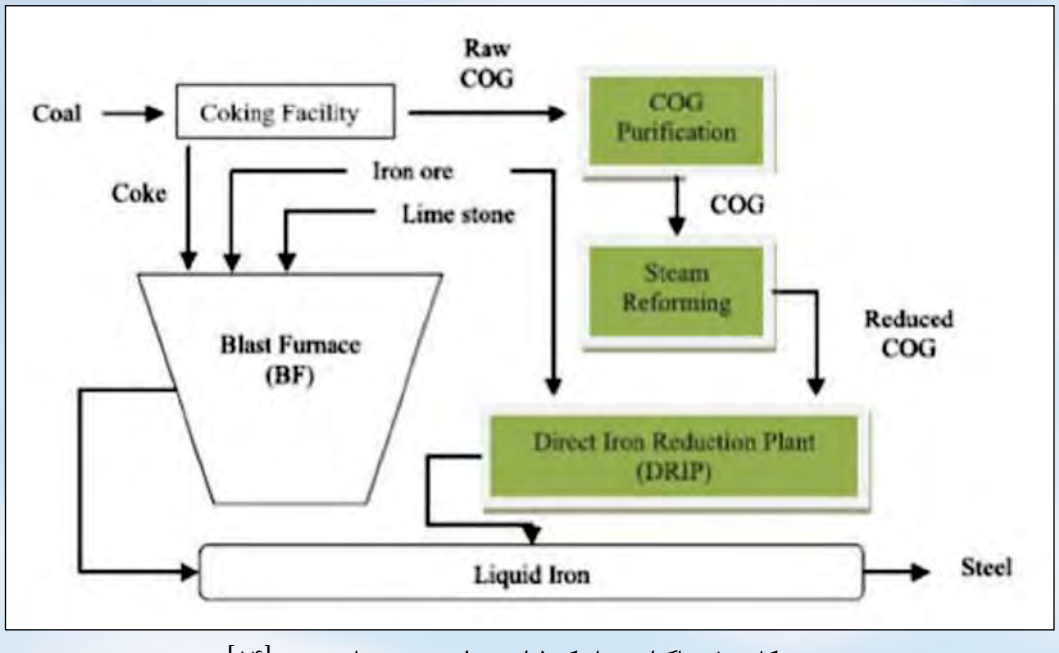


شکل ۸. استفاده از COG [۵۳].

1- Coke Oven Gas
2- Water-Gas Shift Reaction
3- Combined Heat and Power



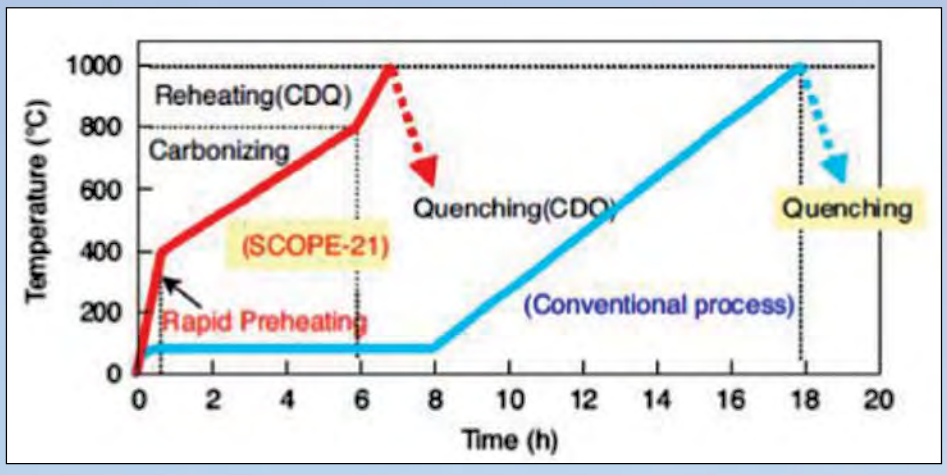
شکل ۹. فرایند نیروگاه CHP بر پایه COG [۵۲].



شکل ۱۰. دیاگرام شماتیک فرایند تولید DRI بر پایه COG [۵۴].

در قالب یک پروژه ملی آغاز کرده است. نام این فرایند جدید SCOPE21 [1] است. در این فرایند زغال سنگ ابتدا به سرعت پیش گرم شده و پس از آن بلافاصله به باتری‌های کک سازی شارژ می‌شود. در این فرایند امکان استفاده از زغال سنگ غیر کک شونده یا کک شونده ضعیف وجود دارد. علاوه بر این بهره‌وری نسبت به روش سنتی ۲/۴ برابر افزایش می‌یابد که دلیل آن زمان ماند کمتر زغال سنگ در فرایند کک سازی است (شکل ۱۱) [۲۲].

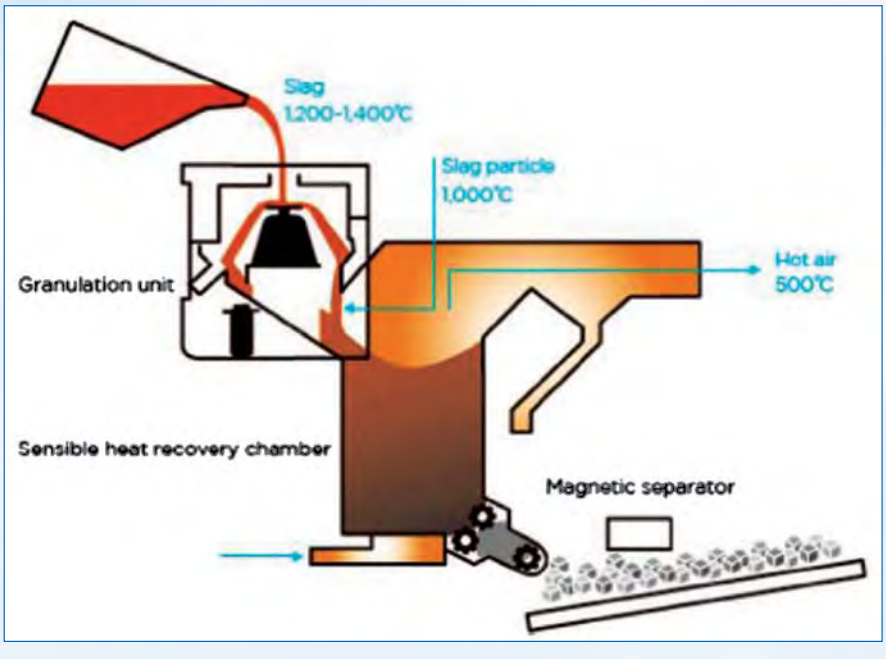
1- Super Coke Oven for Productivity and Environmental Enhancement toward 21st Century



شکل ۱۱. فرایند کک سازی جدید SCOPE۲۱ [۲۲].

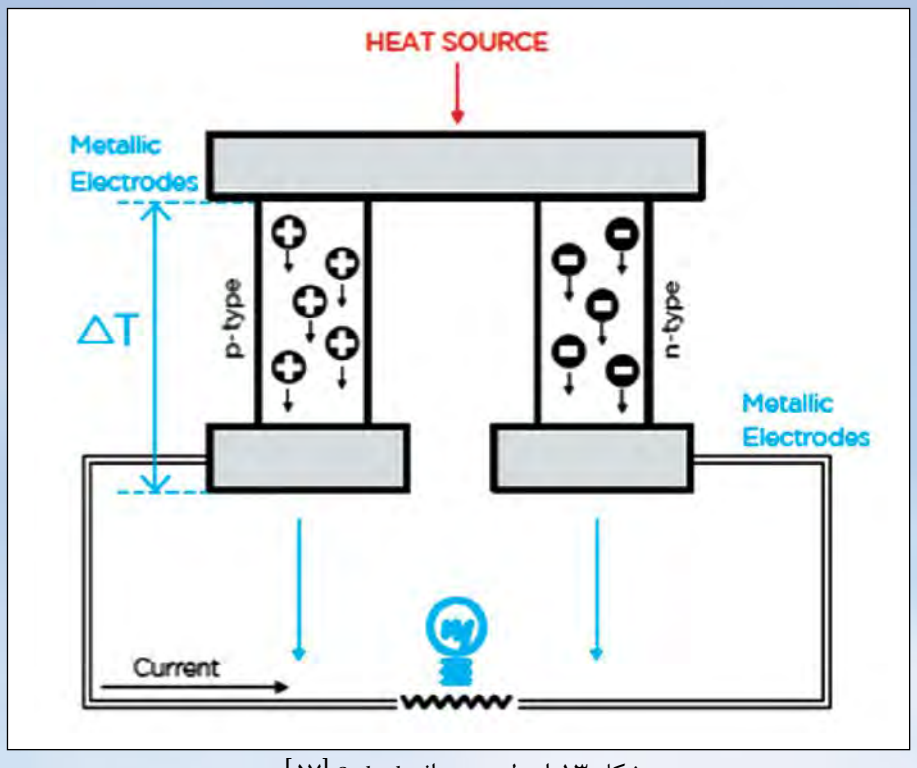
۳-۲) تکنولوژی بازیافت حرارت سرباره مذاب

به طور معمول در صنعت فولاد سرباره‌های مذاب که در دمای ۱۴۵۰-۱۵۵۰°C تخلیه می‌شوند منبع بالقوه انرژی و مواد اولیه هستند. کوئنچ کردن با آب به عنوان روش سنتی بازیافت حرارت، تکنولوژی پایداری به شمار نمی‌آید زیرا علیرغم مصرف بسیار زیاد آب، انرژی قابل ملاحظه‌ای بازیابی نمی‌شود [۵۶]. در سال ۲۰۱۲ شرکت POSCO کره جنوبی موفق به توسعه تکنولوژی جدیدی برای بازیافت انرژی حرارتی سرباره مذاب گردید. ظرفیت این روش ۲ t/h است و قادر است حدود ۵۰٪ انرژی حرارتی سرباره را در دمای ۴۶۰°C بازیابی کند (شکل ۱۲) [۵۷]. بازیافت انرژی جریان‌های حرارتی با دمای پایین یا متوسط به دلایل فنی و اقتصادی امری دشوار تلقی می‌گردد. اخیراً شرکت POSCO اقدام به توسعه تکنولوژی جدیدی در تولید برق نموده است که در آن با استفاده از پدیده‌ای فیزیکی به نام اثر Seebeck انرژی حرارتی به جریان الکتریسیته تبدیل می‌شود (شکل ۱۳) [۵۷]. محققی به نام Zhang [۵۶] در سال ۲۰۱۳ در راستای حفظ و ذخیره انرژی و کاهش مصرف آب در فرایند کوئنچ سرباره، راهکارهایی را برای گرانوله کردن و بازیافت حرارتی پیشنهاد داده است که می‌تواند برای تحقق اهداف توسعه فولادسازی پایدار مفید واقع شود. همچنین در سال ۲۰۱۴ محققی به نام Kuroki [۴۹] تکنولوژی جدیدی به نام سیستم تولید برق ترموالکتریک (TEG)[1] ابداع کرده است که در آن حرارت تلف شده از سرباره داغ مستقیماً به برق تبدیل می‌شود. به طور کلی روش‌های بازیابی حرارت سرباره به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش‌های فیزیکی و روش‌های شیمیایی.



شکل ۱۲. تکنولوژی بازیافت حرارتی سرباره در POSCO [۵۷].

1- Thermoelectric Generation



شکل ۱۳. اصول پدیده اثر Seebeck [۵۷].

۳-۲-۱) روش‌های فیزیکی بازیافت حرارت سرباره

تکنولوژی‌های متعددی برای بازیافت حرارتی سرباره به روش فیزیکی ابداع و توسعه داده شده است. در این میان سه متد فیزیکی که بر اساس مکانیزم خردایش سرباره رایج شده‌اند عبارتند از: خردایش مکانیکی، دمش هوا و گرانوله سازی گریز از مرکز یا سانتریفیوژ. در جدول ۱ مختصری از تکنیک‌های بازیافت حرارتی سرباره که استفاده گسترده‌ای علی الخصوص برای سرباره کوره بلند دارند نشان داده شده داده [۵۸].

۳-۲-۲) روش‌های شیمیایی بازیافت حرارتی سرباره

اخیراً تکنولوژی‌های نوظهوری در حال توسعه هستند که با روش‌های شیمیایی انرژی حرارتی سرباره را بازیابی می‌کنند (جدول۲). محققی به نام Kasai [۷۱] با ابداع روشی سرباره داغ کوره بلند را به انرژی شیمیایی تبدیل کرده است. در این روش سیال پرسرعتی متشکل از مخلوط بخار آب و گاز متان برای خنک کردن سرباره مذاب و گرانوله کردن آن مورد استفاده قرار می‌گیرد که منجر به انتقال حرارت بسیار شدیدی می‌شود. از طرف

جدول ۱. خلاصه روش‌های فیزیکی بازیافت حرارتی سرباره

Research cluster	Granulation	Slag type	Particle size (mm)	Heat exchanger	Heat recovery rate	Ref.
Merotec (Sweden)	Solid impingement	BF slag	~3	Fluidized bed	65	[59]
Kawasaki steel (Japan)	Mechanical stirring	BF slag	40	Partition wall type heat exchanger	50	[60]
Sumitomo metal (Japan)	Mechanical stirring	BF slag	20	Partition wall type heat exchanger	50	[61]
Ishikawajimae Harima Heavy Industries and Sumitomo Metal (Japan)	Single rotating drum	BF slag	10	Fluidized bed	60	[62]
NKK corporation (Japan)	Twin drum	BF slag		Partition wall type heat exchanger	40	[63]
Mitsubishi Heavy Industries and NKK (Japan)	Air blast	Steel slag	~3	Partition wall type heat exchanger	41	[64]
Six major Japanese steel companies (Japan)	Air blast	BF slag		Fluidized bed	48	[65]
Pickering (UK)	Rotating cup	BF slag	2	Fluidized bed	49	[66]
Mizuochi (Japan)	Rotating cup	BF slag	2–4			[67]
CSIRO (Australia)	Spinning disc	BF slag	1–2	Packed bed		[68]
Purwanto (Japan)	Spinning disc	BF slag	~0.8	Chemical process		[69]
KASHIWAYA	Rotating cylinder	BF slag	~1			[70]

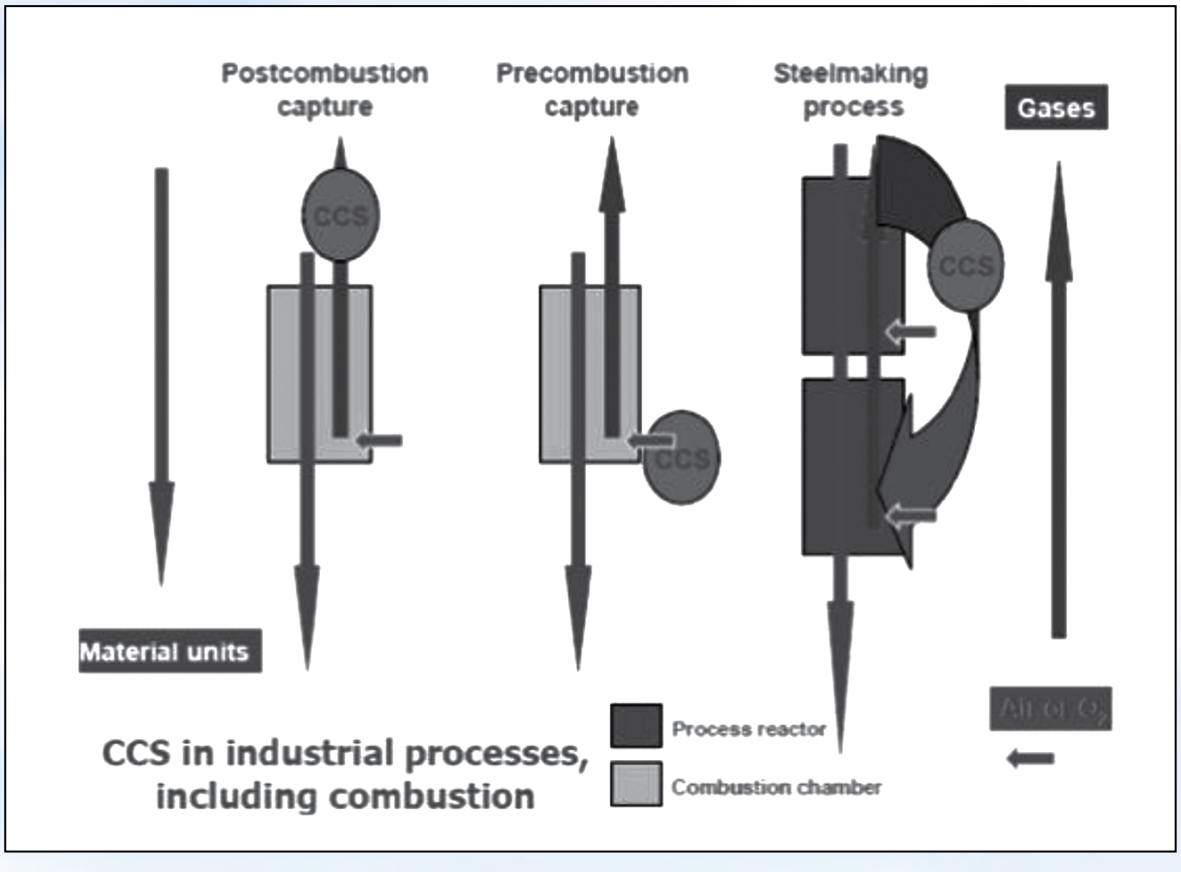
جدول ۲. خلاصه روش‌های شیمیایی بازیافت حرارت تلف شده

Researchers	Process/method name	Function	Ref.
Kasai and Akiyama (Japan)	Methane reforming reaction	Hot blast furnace slag is converted into chemical energy	[71,72]
Purwanto, 2005	Combined SDA with hydrogen generation	Generate combustible gases	[73]
Liu, 2004	Coal gasification	Slag energy convert to coal and air	[74]
Yang (China), 2002	New one-step method of mineral wool production by using the sensible heat of BF slag that is high efficiently	Slag converted into high value added mineral wool	[75]

دیگر محققی به نام Purwanto [۷۳] روش دیگری را ابداع کرده که در آن مخلوط گاز متان و CO_2 با عبور از لوله‌ای حاوی سرباره داغ به گاز قابل اشتعال تبدیل می‌شوند.
محققی به نام Yang [۷۵] در چین فرایندی را توسعه داده است که در آن با استفاده گرمایش همزمان، تصفیه حرارتی، همگن سازی، و فرایندهای جزئی دیگر، سرباره به محصولی با ارزش افزوده قابل توجه به نام پشم سنگ تبدیل می‌شود. نرخ بازیابی حرارتی در این روش تا ۷۰٪ پیش بینی می‌شود [۷۶].
به طور کلی روش‌های شیمیایی بازیافت انرژی سرباره بیشتر جنبه آزمایشگاهی داشته و هنوز در مراحل ابتدایی توسعه قرار دارند لذا به تحقیق و مطالعه بیشتر برای تبدیل شدن به یک راهکار عملی مؤثر نیاز دارند.

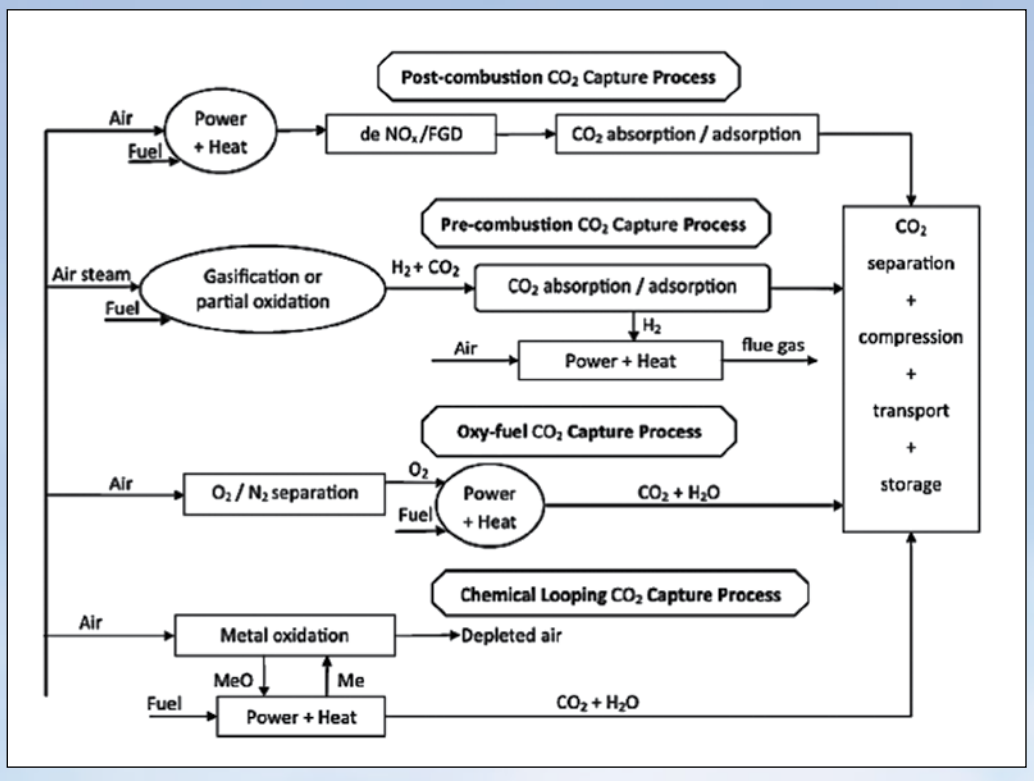
۵) تکنولوژی‌های جمع آوری و ذخیره کربن

جمع آوری و ذخیره‌سازی کربن (CCS)[1] یکی از گزینه‌هایی کلیدی برای رفع معضلات زیست محیطی و گرمایش زمین است و در عین حال می‌توان از آن در صنایع آهن و فولاد استفاده نمود. اجرای CCS در کارخانجات آهن و فولاد به دلیل هزینه‌هایی که نشر CO_2 در آینده برای آنها در بر خواهد داشت، به لحاظ اقتصادی قابل توجیه است. به عنوان مثال می‌توان به طرح تجارت انتشارات گازی در اتحادیه اروپا (EU-ETS)[2] اشاره نمود [۷۷]. شکل ۱۴ کاربرد تکنولوژی CCS در صنعت فولادسازی را تشریح می‌کند. انتخاب روش مناسب جمع آوری CO_2 به نوع فرایند احتراق بستگی دارد [۸۰]. بر این اساس سه نوع سیستم اصلی جمع آوری CO_2 تعریف می‌شود که



شکل ۱۴. بکارگیری CCS در صنعت فولادسازی [۷۹].

1- Carbon Capture and Storage
2- EU Emission Trading Scheme



شکل ۱۵. نمودار جریان فرایندهای جمع آوری CO_2 [۸۱].

عبارتند از: پسا احتراقی، پیش احتراقی و احتراق oxyfuel [۸۱]. در شکل ۱۵ این سه نوع تکنولوژی تشریح شده‌اند. تکنولوژی‌های جمع آوری کربن، CO_2 تغلیظ شده تولید می‌کنند که می‌تواند برای فشرده‌سازی، حمل و نقل، جداسازی یا ذخیره سازی مورد استفاده قرار گیرد. تکنولوژی‌های جمع آوری CO_2 از جریان‌های گازی به موارد زیر تقسیم می‌شوند:

- جذب فیزیکی، شیمیایی یا ترکیب هر دو (سیستم هیبریدی)
- جذب سطحی به کمک ماده جاذب جامد
- جداسازی فیزیکی به کمک غشاء یا غربال‌های مولکولی
- جداسازی فازی به کمک برودت و هیدرات‌های گازی
- ایجاد پیوند شیمیایی از طریق کربنات سازی معدنی

۴-۱) فرایند جذب

در فرایند جذب جداسازی CO_2 از جریان‌های گازی توسط جذب فیزیکی، شیمیایی یا روش هیبریدی صورت می‌پذیرد. فرایند به این اینصورت است که ابتدا در یک ستون به نام ستون جذب[1]، حلال شیمیایی یا فیزیکی CO_2 را حذف می‌کند سپس در ستون دیگری به نام ستون تفکیک[2] حلال مجدداً احیا می‌شود [۳۰]. این فرایند در صنایع شیمیایی، پالایش و فراوری گاز کاربرد وسیعی دارد و می‌توان از آن در صنعت فولاد نیز استفاده نمود.

۴-۲) تکنولوژی جذب شیمیایی

استفاده از حلال‌های شیمیایی مناسب‌ترین روش برای حذف CO_2 محسوب می‌شود. تاکنون این روش برای گازهای خروجی از فرایندهای کوره بلند، BOF، تولید DRI با گاز طبیعی، تولید DRI از طریق بستر سیال و احیای ذوبی آزمایش شده است [۸۲]. مشکل این روش گران بودن آن است زیرا انرژی حرارتی بسیار زیادی برای شکستن پیوند شیمیایی ایجاد شده بین حلال و CO_2 لازم است.

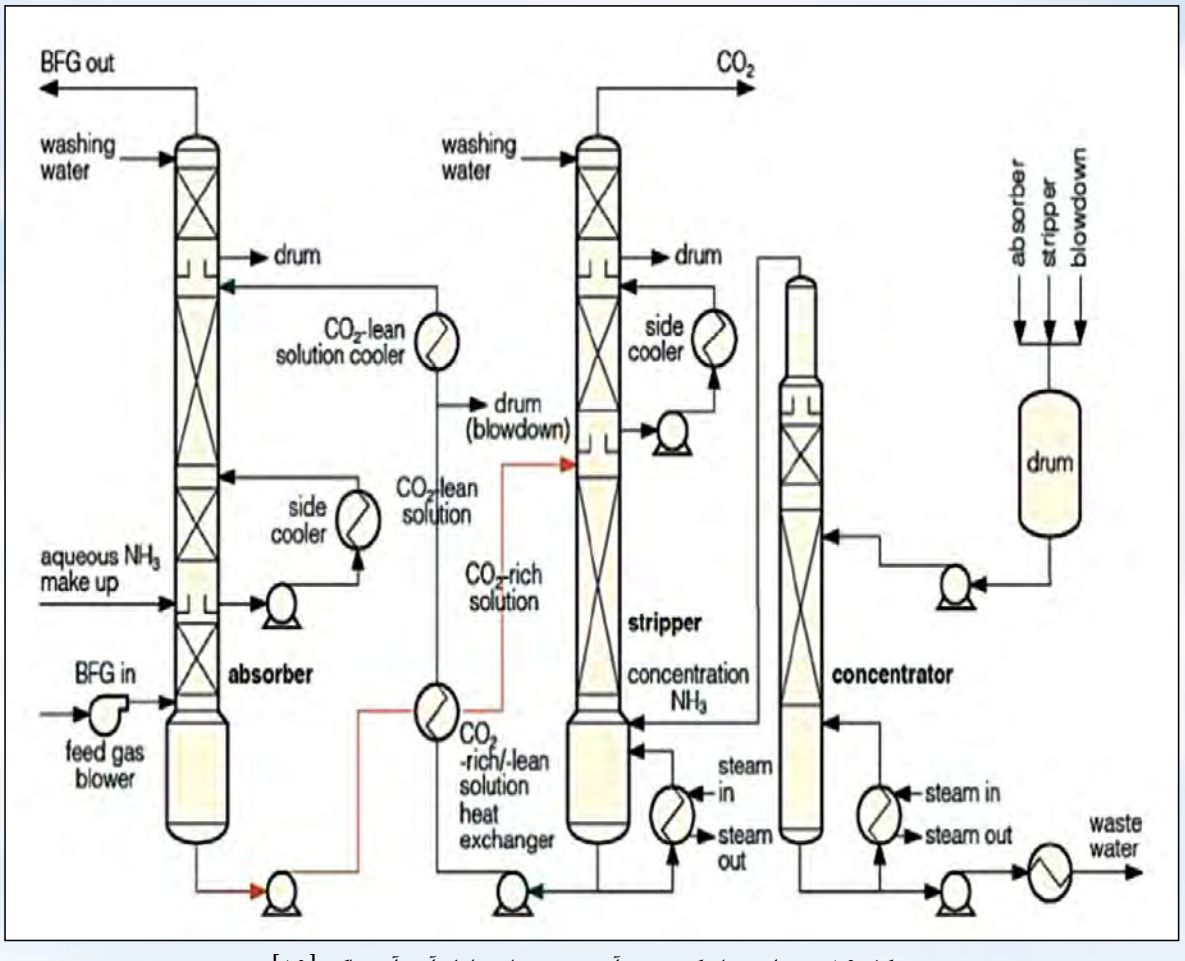
آمین‌ها رایج‌ترین حلال شیمیایی برای جمع آوری CO_2 هستند زیرا قادرند به شکل مؤثری عملیات گزینش و رایش CO_2 را انجام دهند. به عنوان مثال در روسیه از Monoethanolamine (MEA) برای حذف CO_2 از گاز خروجی کوره بلند استفاده می‌شود [۸۳]. استفاده از آمین‌ها معایبی نیز دارد که عبارتند از: خوردگی تجهیزات، فاسد شدن حلال، ظرفیت جمع آوری پایین CO_2، مصرف انرژی بالا در حین احیای مجدد حلال، اشغال فضای زیاد و مشکلات مربوط به پسماندای محصولات ناشی از فساد حلال [۸۴].

محققی به نام Tobiesen [۸۵] عملکرد آمین‌های مختلف را در جذب CO_2 از گاز کوره بلند، مدلسازی کرده است. بر اساس بررسی‌های وی ترکیب 2amino-2-methyl-1-propaol به لحاظ مصرف انرژی راندمان بالاتری نسبت به مخلوط piperazine و methyldiethanolamin دارد. تحقیقات دیگری در خصوص محلول آبی piperazine، 2-(2-aminoethylamino)ethanol (AEEA)، MEA و مخلوط‌های این سه ترکیب برای جذب CO_2 از گاز خروجی پیش گرمکن (حاوی ۳۰٪ حجمی CO_2)،

1- Absorption Column
2- Stripping Column

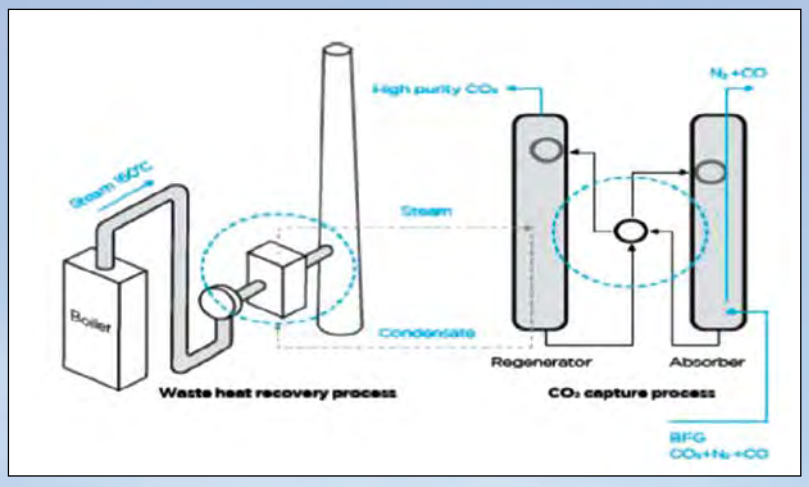
توسط محققی به نام Cheng [۸۶] انجام شده است.
حلال‌های غیرآلی مانند کربنات سدیم و پتاسیم نیز قابلیت جذب CO_2 دارند. این حلال‌ها سرعت واکنش پایینی دارند و عین حال مصرف انرژی برای احیای مجدد آنها نسبت به حلال‌های آلی بیشتر است در عوض به لحاظ اقتصادی دسترسی به آنها راحت‌تر است و البته نرخ خوردگی کمتری ایجاد می‌کنند [۸۷]. از جمله این حلال‌ها می‌توان به potassium carbonate/hindered cyclic diamine اشاره نمود که توسط محققی به نام Yoon [۸۸] توسعه داده شده است و می‌تواند در صنایع فولاد برای گازهای حاوی ۱۵ الی ۲۰ درصد CO_2 مورد استفاده قرار گیرد.

در کره استفاده از محلول آبی آمونیاک برای جذب CO_2 از گاز خروجی کوره بلند، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. ادعا می‌شود این محلول راندمان جذب بالاتر، ظرفیت بارگذاری CO_2 بیشتر (۳ برابر MEA)، هزینه کمتر و نیاز به انرژی احیای مجدد کمتری دارد [۸۹]. عیب این حلال اتلاف آن در حین فرایند به دلیل فرار بودن و رسوب سازی است. مدت زیادی است که از این حلال برای حذف H_2S و دیگر ترکیبات سولفور دار از COG استفاده می‌شود [۹۵]. شرکت POSCO در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار اقدام به احداث واحدی در مقیاس نیمه صنعتی نمود که در آن از آمونیاک برای جذب و جداسازی CO_2 استفاده می‌شود. ظرفیت این واحد ۵۰ Nm^3/h است [۹۰]. برای کاهش اتلاف آمونیاک، از آب شستشو دهنده در بخش فوقانی ستون‌های جذب و تفکیک استفاده می‌شود. سپس آمونیاک در یک ستون تغلیظ بازیابی شده و به چرخه فرایند باز می‌گردد (شکل ۱۶). در این فرایند راندمان جمع آوری CO_2 بالای ۹۰٪ و خلوص آن ۹۵٪ است [۸۹].
در سال ۲۰۱۰ واحد دیگری در مقیاس نیمه صنعتی با ظرفیت ۱۰۰۰ Nm^3/h گاز کوره بلند در Pohang Steelworks احداث گردید. در شکل ۱۷ نحوه جمع آوری CO_2 از محصولات جانبی گازی کارخانه فولادسازی توسط فرایند جذب شیمیایی با آمونیاک نشان داده شده است [۹۱].
فدراسیون آهن و فولاد ژاپن (JISF)[1] نیز در قالب پروژه COURSE 50 اقدام به توسعه تکنولوژی جمع آوری CO_2 از گاز خروجی کوره بلند با روش جذب شیمیایی نموده است. در این فرایند از محلول آبی قلیایی استفاده شده است (شکل ۱۸) [۹۲].



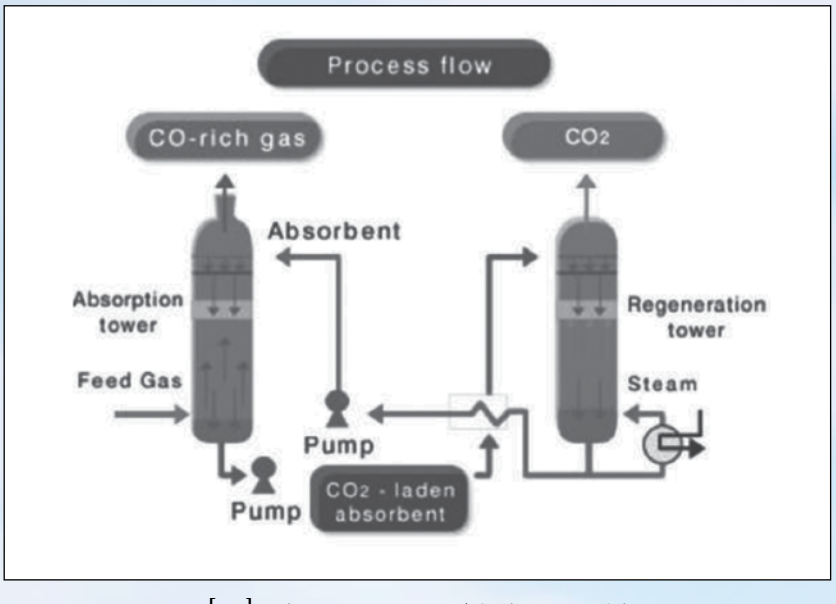
شکل ۱۶. نمودار شماتیک جمع آوری CO_2 با محلول آبی آمونیاک [۸۹].

1- Japan Iron and Steel Federation

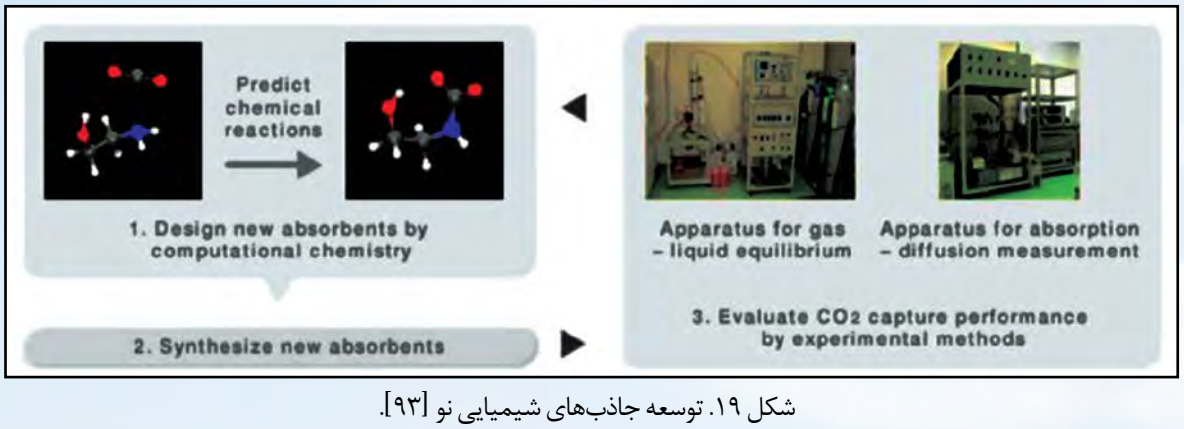


شکل ۱۷. جمع آوری CO_2 از محصولات جانبی گازی فولادسازی با استفاده از آمونیاک [۹۱].

هدف این پروژه بالا بردن ظرفیت تا حدود ۳۰ tCo_2/day است. چالش‌های فنی که در این پروژه به آن‌ها پرداخته شده است عبارتند از: کاهش مصرف انرژی، توسعه یک محلول جاذب جدید، بکارگیری مؤثر انرژی حرارتی تلف شده و نهایتاً کمی کردن تأثیر تکنولوژی‌های جمع‌آوری CO_2 بر روی فرایندهای فولادسازی. در این پروژه از متدی محاسباتی برای پیش بینی واکنش‌های شیمیایی استفاده شده است و پس از آن از طریق روش‌های آزمایشگاهی عملکرد جمع آوری CO_2 توسط ماده جاذب مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۱۹) [۹۲].



شکل ۱۸. جریان فرایند در جذب شیمیایی [۹۲].



شکل ۱۹. توسعه جاذب‌های شیمیایی نو [۹۳].

۴-۳) فرایندهای جذب سطحی

در ایـن فرایندهـا گاز حـاوی CO_2 از روی بسـتری جامـد از جنـس مـاده جـاذب (ماننـد زئولیـت یـا کربـن اکتیـو) عبـور داده می‌شـود. در مرحلـه بعـد جـدا کـردن CO_2 از مـاده جاذب بـا سـه روش می‌توانـد صـورت پذیـرد: کاهـش فشـار (PSA [۱] و VPSA [۲])، افزایـش دمـا (TSA)[۳] و اعمـال جریـان الکتریکـی بـا ولتـاژ کـم (ESA)[۴].

تنهـا روش‌هـای PSA و VPSA بـه شـکل تجـاری در صنایـع فولاد و دیگـر واحدهـای صنعتـی اسـتفاده شـده‌اند [۹۴]. فدراسـیون آهـن و فـولاد ژاپـن در قالـب پـروژه COURSE 50 اقـدام بـه توسـعه تکنولـوژی جـذب سـطحی فیزیکـی نمـوده اسـت کـه قـادر اسـت بـا صـرف انـرژی کـم CO_2 را جـذب و بازیابـی نماید. در ایـن تکنولـوژی CO_2 بـا کمـک نیروهـای واندروالس به سـطح مـاده جـاذب پیونـد می‌خـورد. سـپس بـا کاهـش فشـار ایـن پیوندهـا شکسـته شـده و CO_2 آزاد شـده و جمـع آوری می‌شـود (شـکل ۲۰). ظرفیـت ایـن طـرح tCO_2/day ۳ اسـت [۹۲].

در سـال ۲۰۱۱شـرکت POSCO اقـدام بـه توسـعه تکنولـوژی جداسـازی CO و CO_2 از محصـولات جانبـی گازی فولادسـازی بـر اسـاس روش بهینـه شـده PSA نمـوده اسـت. ظرفیـت ایـن طـرح کـه بصـورت یـک واحـد کوچـک بـا مقیـاس نیمـه صنعتـی اسـت حـدود Nm^3/h ۱ بـوده و میـزان خلـوص CO جمـع آوری شـده بـالای ۹۹٪ اسـت[۵۷].

۴-۴) فرایندهای غشائی

بـه طـور کلـی انتخـاب جنـس غشـاء بـرای جداسـازی گاز، به فعـل و انفعـالات شـیمیایی یا فیزیکی بین گاز و غشـاء وابسـته اسـت. جنـس غشـاء می‌توانـد پلیمـری، سـرامیکی، فلـزی یـا زئولیـت باشـد. بـا ایـن روش امـکان دسـتیابی بـه راندمـان جداسـازی ۸۰٪ میسـر اسـت [۳۰]. در سـال ۲۰۰۷ محققـی بـه نـام Lie [۹۵] بـا اسـتفاده از شـبیه سـازی، عملکـرد سـه نـوع غشـاء را در خصـوص جمـع آوری CO_2 از گاز خروجـی کـوره بلنـد مـورد ارزیابـی قـرار داد. نتایـج ایـن بررسـی نشـان می‌دهـد در کـوره بلندهایـی کـه اکسـیژن بـه درون آن‌هـا دمیـده می‌شـود امـکان جـذب و بازیابـی ۹۷ درصـدی CO_2 از گاز خروجـی وجـود دارد.

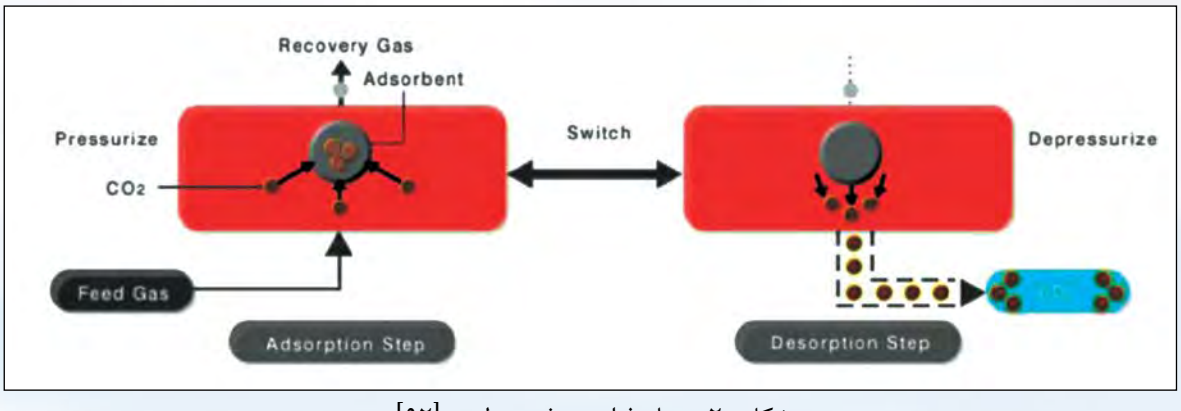
در اسـترالیا نیـز در قالـب پـروژه‌ای بـه نـام CO_2CRC، توسـعه تکنولـوژی جداسـازی و جـذب CO_2 توسـط غشـاء در حـال انجـام اسـت. در ایـن پـروژه اسـتراتژی‌های متعـددی در خصـوص جداسـازی مـورد آزمایـش قـرار کرفتـه اسـت. همچنیـن تأثیـر گاز سـنتزی و اجـزای کوچـک تشـکیل دهنـده گاز بـر فراینـد جداسـازی مـورد بررسـی قـرار گرفتـه اسـت [۹۶].

۴-۵) فرایندهای برودتی

بـا اسـتفاده از سـرمایش و کندانـس کـردن، امـکان جداسـازی CO_2 از گازهـای دیگـر وجـود دارد. در پـروژه‌ای کـه در قالـب برنامـه ULCOS تعریـف شـده اسـت جداسـازی CO_2 بـا روش PSA از گاز خروجـی کـوره بلنـد صـورت می‌گیـرد ولـی بـرای خالـص سـازی بیشـتر و تبدیـل CO_2 بـه مایـع بـه منظـور انتقـال و انبـارش آن در زیـر زمیـن، از فراینـد برودتی اسـتفاده شـده اسـت. عـلاوه بـر ایـن واحدهـای فراینـد برودتـی قـادر بـه تولیـد جریـان گاز احیـا کننـده بـرای ورود بـه کـوره بلنـد هسـتند. واحدهـای فراینـد برودتـی در تکنولـوژی HIsarna نیز مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیرنـد [۹۷].

۴-۶) هیدرات‌های گازی

جداسـازی CO_2 بـا هیدرات‌هـای گازی هنـوز در فـاز مطالعاتی قـرار دارد. در ایـن تکنولـوژی CO_2 بـه کمـک آب، تحـت فشـار زیـاد و دمـای بسـیار پاییـن بـه یـک ترکیـب هیدراتـه اندرون‌گیـر [۵] تبدیـل می‌شـود. بدیهـی اسـت بـا گرمـا دادن یـا کاهـش فشـار CO_2 از هیدرات‌هـا جـدا می‌شـود [۹۸]. فراینـد هیدراتـه کـردن پیوسـته گاز خروجـی کـوره بلنـد بـا کمـک مـاده هیدراتـه کننـده‌ای بـه نـام TBAB [۶] توسـط محققـی بـه نـام Duc [۹۹] در حـال مطالعـه و بررسـی اسـت. بـرای انتقـال از طریـق خـط لولـه و انبـارش، بـه شـش مرحله کریستالیزاسـیون نیـاز اسـت تـا مشـخصات مـورد نظـر بـرای



شکل ۲۰. جریان فرایند جذب سطحی [۹۲].

1- Pressure Swing Adsorption
2- Vacuum Pressure Swing Adsorption
3- Temperature Swing Adsorption
4- Electric Swing Adsorption
5- Clathrate Hydrate
6- Tetra-n-butyl ammonium bomide

CO_2 احـراز گـردد (<4vol% CO_2, 0 °C, 11 MPa). فشـارها در ۶ مرحلـه بیـن ۰/۷۵ تـا ۵ MPa متغیـر اسـت و دمـا در هـر کریسـتالیزاتور بـر روی ۱۰ °C ثابـت نگـه داشـته می‌شـود. مصـرف جریـان بـرق بسـته بـه نـوع کـوره بلنـد بیـن ۳۶۲ تـا ۱۳۰۲ kWh/tCO_2 متغیـر اسـت و بـه تبـع آن هزینه‌هـا بیـن ۱۴/۵ تـا ۲۹/۶ e/tCO_2 متغیـر خواهـد بـود (جـدول ۳).

جـدول ۳. مصـرف بـرق و هزینه‌هـای جمـع آوری CO_2 هیدراتـه شـده [۹۹].

۴-۷) کربنات سازی معدنی

در فرایندهـای آهـن سـازی و فولادسـازی حجـم زیـادی سـرباره تولیـد می‌شـود کـه ایـن سـرباره‌ها حـاوی مقادیـر زیـادی اکسـیدهای فلـزات قلیایـی خاکـی هسـتند (ماننـد سـیلیکات‌ها، آهـک و غیـره). ایـن مـواد معدنـی می‌تواننـد بـرای جـذب CO_2 و ذخیره‌سـازی آن بـه شـکل کربنـات مـاده معدنـی مـورد اسـتفاده قـرار گیرنـد. ترکیـب پایـدار کربنـات کلسـیم (کلسـیت) می‌توانـد از طریـق واکنـش اکسـید کلسـیم و اکسـید منیزیـم بـا CO_2 بوجـود آیـد [۹۸].

فرایندهای کربنات سازی به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند [۱۰۰]:

۱) فرایندهـای مسـتقیم کـه در آن واکنش‌هـا بـا CO_2 می‌تواننـد در فـاز آبـی [۱۰۱] یـا فصـل مشـترک جامـد-گاز صـورت پذیـرد.

۲) فرایندهـای غیـر مسـتقیم کـه در آن ابتـدا فلـز قلیایـی خاکـی از شـبکه سـرباره اسـتخراج شـده، سـپس بصـورت کربنـات رسـوب داده می‌شـود. از جملـه عوامـل شـیمیایی اسـتخراج فلـزات قلیایـی خاکـی از سـرباره می‌تـوان بـه اسـید اسـتیک [۱۰۲و۱۰۳]، اسـید کلریدریـک [۱۰۵] و نمک‌هـا و هیدروکسـیدهای آمونیـاک [۱۰۶] اشـاره نمـود.

۴-۸) مکانیزم کنترل آلودگی هوا

بـرای بـه حداقل رسـاندن انتشـارات گازی در راسـتای حفاظت از محیـط زیسـت، ابتـدا بایـد مراکـز تولیـد انتشـارات گازی در سـطح کارخانـه شناسـایی و تحـت نظـارت قـرار گیرد. سـپس اقدامـات لازم بـرای بهینـه سـازی و اصـلاح فرایندهـا بـا هدف کاهـش میـزان انشـارات گازی در دسـتور کار قـرار گیـرد.

گازهـای حاصـل از احتـراق حـاوی مقادیـر قابـل توجهـی ترکیبـات هالوژنـی و سـولفور دار هسـتند کـه بـه گازهـای اسـیدی موسـومند. ترکیبـات هالوژنـی عمدتـاً هیدرات‌هـای هالوژنـی ماننـد HCl می‌سـازند و ترکیبـات سـولفور دار معمـولاً بـه SO_2 تبدیـل می‌شـوند. روش‌هـای متعـددی بـرای حـذف گازهـای اسـیدی وجـود دارد [۱۰۷]. انجمـن جهانـی فـولاد مکانیزم‌هایـی را بـرای کنتـرل آلودگـی هـوا بـه شـرح زیـر ارائـه کـرده اسـت [۱۰۸و۱۰۹]:

- سیستم‌های فیلتراسیون کیسه ای یا bag house
- پالایش شیمیایی
- اکسیدسازی حرارتی

	N_2-free BF with shaft injection (TGR-BF)	Conventional BF top gas	N_2-free BF plasma	Conventional BF flue gas
CO_2 concentration of inlet gas, %	36	23	35	24
Electric power consumption, kWh (GJ)/tCO_2 captured	420 (1.51)	1302 (4.69)	362 (1.3)	730 (2.63)
Cost, e/tCO_2 captured	16.8	22.4	14.5	29.6

• سیستم‌های scrubber
• فرونشاندن غبار
در سیستم‌های مدرن کنترل آلودگی هوا معمولاً از مراحل چندگانه‌ای برای حذف یا کاهش ذرات فلزی سنگین، خاکستر، گازهای آلی و غیر آلی و همچنین دی اکسین‌ها از گاز خروجی دودکش‌ها، استفاده می‌کنند [۱۱۰].

۶) استفاده بهینه از آب و مدیریت پساب در صنعت فولاد

آب و انرژی از اجزای مهم و تعیین کننده صنعت آهن و فولاد به شمار می‌آیند و مدیریت آنها در تولید پایدار نقش بسیار مهمی ایفا می کنند. مقادیر زیادی آب در خنک سازی مستقیم و غیر مستقیم، پاکسازی گازها، شکستن پوسته اکسیدی و شستشوی گازها در اسکرابرها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱۲]. این صنعت نه تنها مصرف کننده بزرگ آب است بلکه از طرف دیگر می‌تواند خطرات و معضلاتی را از ناحیه ایجاد و آزادسازی پساب متوجه محیط زیست نماید. در صورتی که پساب کارخانجات فولاد قبل از تخلیه در محیط زیست به شکل مناسبی تصفیه نشده باشد می‌تواند اثرات زیست محیطی مخربی را برای آب منطقه بوجود آورد. گستره وسیعی از آلاینده‌های سمی مانند فلزات محلول، مشتقات نفتی، فنل‌های فرار، آرسنیک و غیره در پساب صنایع فولاد پیدا می‌شود [۱۱۳].
کمسیون اروپا از طریق EIPPCB [1] بهترین تکنیک‌های موجود برای مدیریت پساب کارخانجات را به شرح زیر پیشنهاد داده است [۱۱۲]:
• اجتناب از مصرف آب آشامیدنی در خطوط تولید
• افزایش تعداد یا ظرفیت سیستم‌های گردش آب در مواقعی که قرار است واحد جدیدی احداث شود یا واحد تولیدی موجود نوسازی و به روز رسانی گردد.
• متمرکز کردن توزیع آب تازه ورودی
• استفاده مجدد از آب در مقاطع و واحدهای جداگانه و پشت سر هم تا زمانی که پارامتر مشخصی از آب در محدوده مورد نظر قرار نگیرد
• استفاده از آب غیر قابل استفاده واحدهای تولیدی برای مصارف دیگر کارخانه
• جداسازی پساب تصفیه شده از پساب تصفیه نشده. بدینوسیله امکان دور ریز پساب با روش‌های مختلف و با هزینه‌های معقول وجود خواهد داشت.
• بهره برداری و استفاده از آب باران در صورت امکان
از طرف دیگر با توجه به دمای نسبتاً بالای پساب (کمتر از ۱۰۰ °C) و گازهای خروجی (کمتر از ۲۰۰ °C) امکان بازیابی حرارتی آنها وجود دارد. در این راستا محققی به نام Koichi Nakaso در سال ۲۰۱۴ مولد تولید بخار جدیدی ارائه کرد که از انرژی حرارتی پساب فرایند تولید آهن و فولاد استفاده می‌نمود [۱۱۴]. وی بیان داشت استفاده مجدد از آب زهکشی شده به دلیل ارتقاء عملکرد سیستم، روشی مؤثر و مفید در کاهش نشر CO_2 محسوب می‌شود. محققی به نام Gu [۱۱۱] با تحلیل مشخصه‌های صنعت آهن و فولاد و با نگاه به ارزیابی چرخه حیات، یک مدل محاسباتی برای مصرف آب پیشنهاد داده است. همچنین وی با همکاری محققی دیگر به نام Fu [۱۱۵] نشان داد که در صورت استفاده از تکنولوژی کوئنچ خشک در فرایند کک سازی، صرفه جویی ۱۰ درصدی معادل ۰/۳۸ تن آب به ازای تولید هر تن کک حاصل خواهد شد. در نهایت باید اذعان کرد برای کاهش مصرف مستقیم آب، صنایع آهن و فولاد چاره‌ای جز ارتقاء و بهبود فرایندهای تولیدی همچون سیستم‌های بازیابی و استفاده مجدد آب، سیستم‌های تصفیه آب‌های خنک کننده یا استفاده از تجهیزات پیشرفته و مدرن ندارند.

1- European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau

۷) مروری بر آخرین دستاوردهای تکنولوژی در کاهش نشر CO_2

به منظور مهار کردن نشر CO_2، دولت‌ها و سازمان‌های بین المللی نیاز به ابداع و بکارگیری تکنولوژی‌های جدید و پیشرو در زمینه تولید فولاد دارند. در سال ۲۰۰۳ انجمن جهانی آهن و فولاد برنامه‌های آخرین دستاوردهای تکنولوژی کاهش CO_2 را به عنوان راه حلی مبتکرانه برای تبادل دانش و اطلاعات فنی بین فعالیت‌های مرتبط در مناطق مختلف جهان مطرح کرد [۱۱۶]. تحقیقات و سرمایه‌گذاری های متعددی در کشورها و مناطق زیر در این زمینه صورت گرفته است [۲۷]:

- اتحادیه اروپا (Ultra-Low CO_2 Steelmaking، یا ULCOS I و ULCOS II)
- ایالات متحده آمریکا (American Iron and Steel Institute)
- کانادا (Canadian Steel Producers Association)
- آمریکای جنوبی (ArcelorMittal Brazil)
- ژاپن (Japanese Iron and Steel federation)
- کره (POSCO)
- چین (Bao Steel)
- تایوان (China Steel)
- استرالیا (Blue Scope Steel/ One Steel CSIRO Coordination)

طیف گسترده‌ای از متخصصان صنعتی و دانشمندان از آزمایشگاه‌ها و مؤسسات آکادمیک در سراسر جهان در قالب این برنامه‌ها در حال فعالیت به منظور ابداع تکنولوژی‌هایی هستند که بتوانند بخش بزرگی از نشر CO_2 در جهان را کاهش دهد. آنها امکان‌سنجی اجرای این تکنولوژی‌ها را در سطوح مختلف از آزمایشگاه تا واحدهای نیمه صنعتی و نهایتاً استفاده تجاری، انجام می‌دهند.

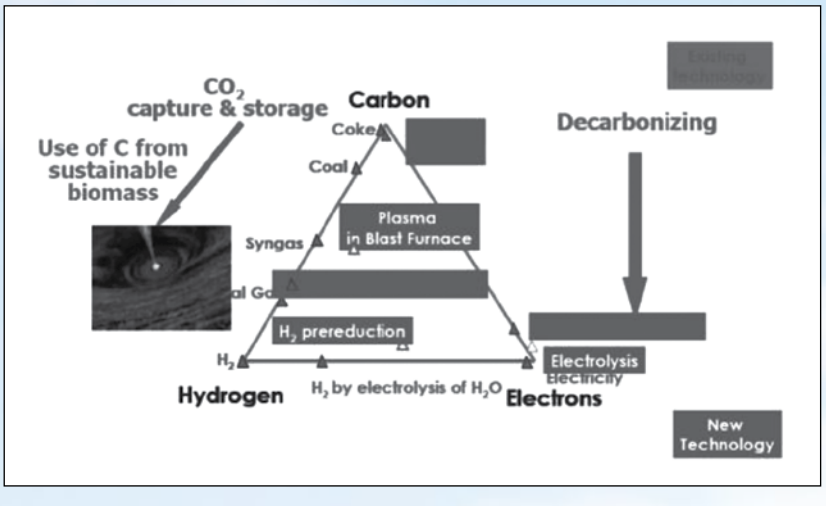
۶-۱) برنامه ULCOS [1] در اتحادیه اروپا

اتحادیه اروپا این برنامه را در سال ۲۰۰۴ آغاز کرده است و به دو فاز تقسیم می‌شود: ULCOS-1 (۲۰۰۴) و ULCOS-2 (۲۰۱۰). هدف اصلی از این طرح عظیم کاهش حداقل ۵۰ درصدی نشر CO_2 است یعنی از حدود تولید ۲ تن CO_2 به ازای تولیدهر تن فولاد به تولید در حدود ۱ تن CO_2 به ازای تولیدهر تن فولاد رسانده شود. در شکل ۲۱ مفاهیم مطرح شده از طرف ULCOS در خصوص کاهش نشر CO_2 مشاهده می‌شود. این ماتریس مثلثی تشریح می‌کند که چگونه عوامل احیا می‌توانند از میان سه گزینه موجود یعنی کربن، هیدروژن و الکترون انتخاب شوند. در این نمودار سه گانه کلیه منابع انرژی موجود نیز ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود زغال سنگ نزدیک کربن روی خط کربن- هیدروژن قرار دارد، گاز طبیعی نزدیک هیدروژن و هیدروژن حاصل از الکترولیز آب بر روی خط هیدروژن- الکترون قرار دارد و موارد مشابه [۲۰].

این برنامه چهار استراتژی کلیدی دارد که به شرح زیر است:

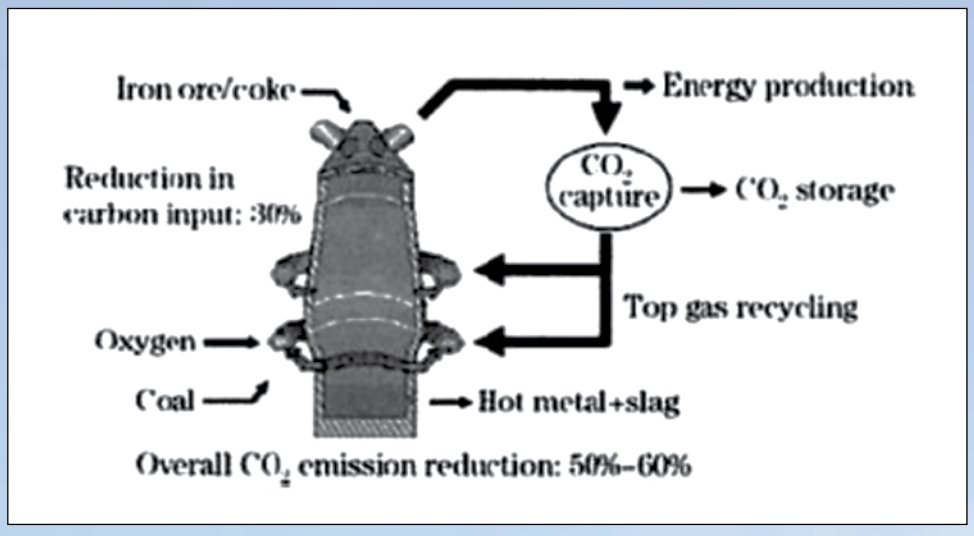
۶-۱-۱) تکنولوژی بازیافت گاز خروجی کوره بلند یا TGR-BF [2]

در این تکنولوژی گاز خروجی کوره بلند پس از حذف CO_2 به کمک تکنولوژی CCS، به عنوان عامل احیا مجدداً وارد کوره می‌شود. ادعا می‌شود با این تکنولوژی می‌توان نشر CO_2 را تا ۵۰٪ کاهش داد (شکل۲۲) [۱۱۷]. در سال ۲۰۰۷ اولین آزمایش در MEFOS شهر لولیو در کشور سوئد به صورت موفقیت آمیزی آغاز شد نتایج حاکی از کاهش ۲۴ درصدی نشر CO_2 در عین پایداری حرارتی و راندمان بالای فرایند است. پس از آن در فاز دوم، اتحادیه اروپا صدها میلیون یورو برای ارتقای این تکنولوژی هزینه کرده است و در صورت موفقیت آمیز بودن، این طرح قادر خواهد بود سالانه ۱/۵ Mt از تولید CO_2 بکاهد که معادل یک سوم CO_2 تولیدی ازکوره بلندهای سنتی است [۱۱۸].



شکل ۲۱. خط سیر آخرین دستاوردهای تکنولوژی ULCOS [۲۰].

1- Ultra Low Carbon Dioxide Steelmaking
2- Top Gas Recycling Blast Furnace



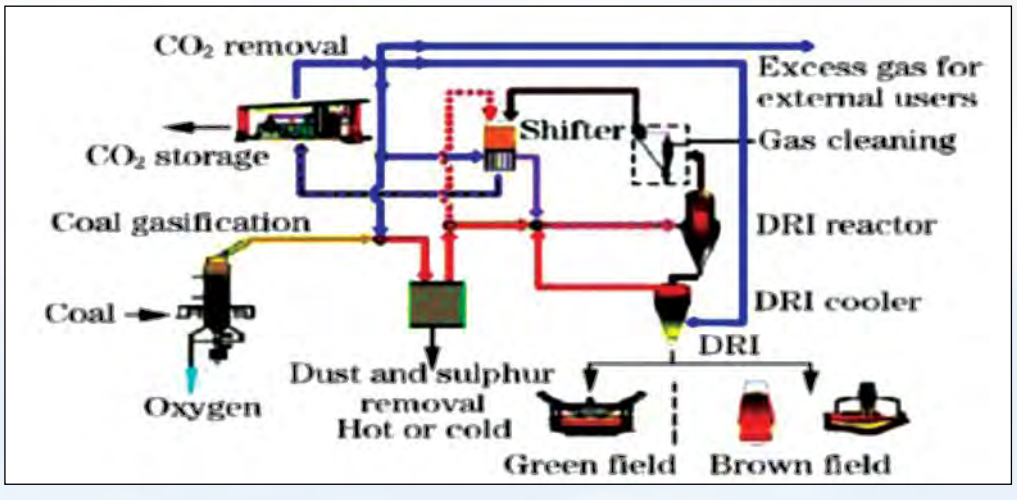
شکل ۲۲. شماتیک فرایند TGRBF–CCS

۶-۱-۲) تکنولوژی HIsarna[2]

HIsarna یک تکنولوژی احیای ذوبی است که با فرایندهایی نظیر پیش گرمایش زغال سنگ و تجزیه حرارتی جزیی ترکیب شده است. به طور کلی از یک مخزن اسملتر[1] برای احیای کامل سنگ معدن و یک سیکلون ذوبی برای ذوب و احیای نهایی آن تشکیل شده است. با حذف فرایندهایی همچون سینتر و کک سازی واضح است که نشر CO_2 کاهش خواهد یافت. علاوه بر این در صورت استفاده از گاز طبیعی یا زیست توده به جای زغال سنگ، تصفیه گازهای حاصل از احتراق، جذب و جداسازی CO_2 و همچنین بازیافت انرژی حرارتی، این تکنولوژی می‌تواند حدوداً تا ۷۰٪ نشر CO_2 را کاهش دهد [۱۱۹]. یک واحد نیمه صنعتی توسط گروه آهن و فولاد TATA در شهر آیمودن هلند در سال ۲۰۱۰ با خروجی ۶۵ kt در سال احداث شده است. در صورت موفقیت آمیز بودن این طرح، پیش بینی می‌شود این تکنولوژی طی ۱۰ تا ۲۰ سال آینده در سطح تجاری مورد استفاده قرارگیرد [۱۲۰].

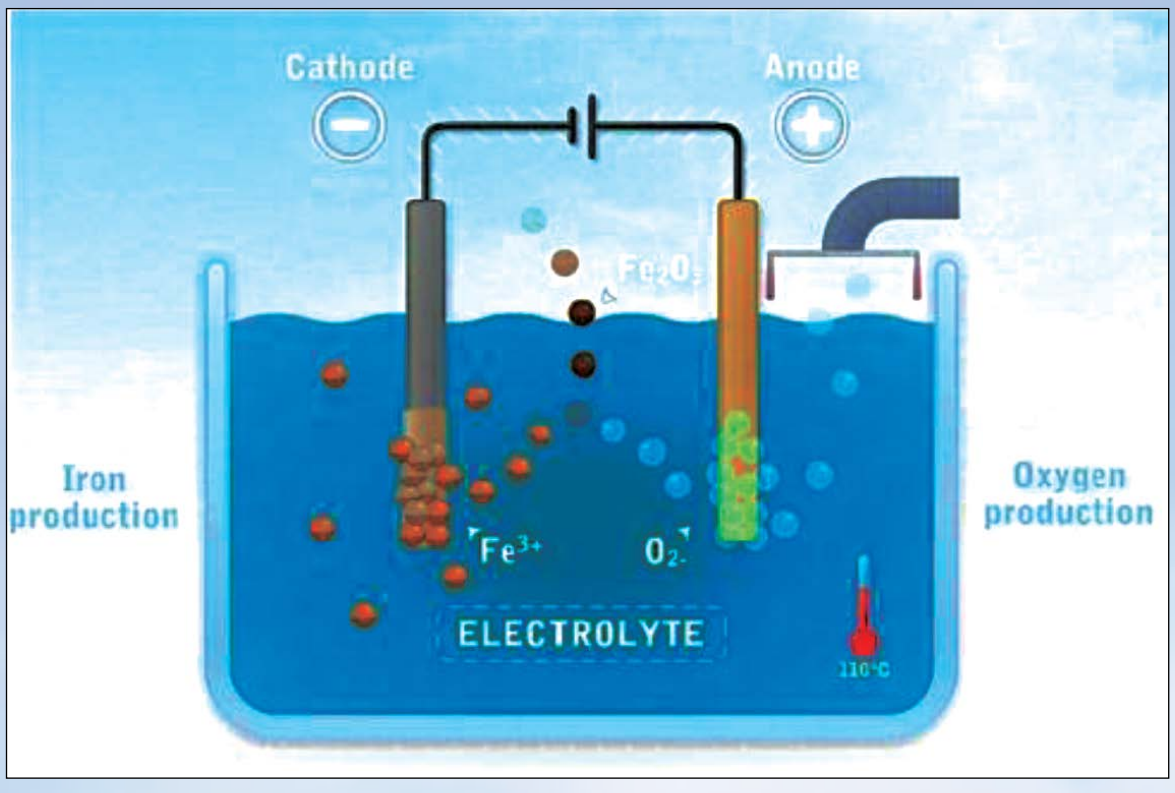
۶-۱-۳) تکنولوژی ULCORED[3]

هدف ULCORED استفاده و مصرف گاز طبیعی برای احیای مستقیم سنگ آهن پیشگرم شده بدون عملیات سینترینگ یا غیره و تولید DRI برای استفاده در کوره‌های EAF است. برای این منظور استفاده از رآکتورهای گازسازی یا استفاده از روش اکسیداسیون جزئی گاز طبیعی به جای روش سنتی شکست گاز در ریفرمرها مورد بررسی قرار گرفته است. قابل ذکر است بازیافت گاز خروجی از مدول احیا و انجام پیش گرم نیز نقش بسزایی در کاهش مصرف گاز طبیعی دارد (شکل ۲۳) [۱۲۱]. با این روش می توان نشر CO_2 را تا ۶۰٪ کاهش داده و در عین حال احیای مستقیم را به فرآیندی اقتصادی‌تر تبدیل نمود.



شکل ۲۳. شماتیک فرایند احیا مستقیم ULCORED [۱۳].

1- Smelter
2- Direct Reduced Iron with Natural Gas
3- Direct Electrolysis of Iron Ore



شکل ۲۴. شماتیک الکترولیز سنگ آهن [۱۲۲].

۶-۱-۴) تکنولوژی ULCOWIN

این تکنولوژی همان الکترولیز مستقیم سنگ آهن است که محصول آن آهن و اکسیژن بوده و خبری و از نشر CO_2 در آن نیست. دمای واکنش حدود ۱۱۰ °C است و در آن سنگ آهن و آهن به ترتیب به عنوان آند و کاتد مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲۴). در حال حاضر این تکنولوژی نرخ تولید بسیار پایینی در حدود ۵ کیلوگرم در روز دارد ولی در عین حال هزینه‌های تولید آن نیز بسیار کم است. بر این اساس تیم ULCOS فرایند جدیدتری به نام ULCOLYSIS را توسعه داده است که در آن سنگ آهن در دمای ۱۶۰۰ °C بصورت مذاب با استفاده از جریان الکتریکی الکترولیز می‌شود [۱۲]. این تکنولوژی هنوز در فاز مطالعاتی قرار دارند و به اندازه سه روش قبل توسعه نیافته است [۱۲۲].

۶-۱-۵) عملکرد اقتصادی تکنولوژی‌های ULCOS

در جدول شماره ۴ شاخص‌های عملکرد اقتصادی تکنولوژی‌های ULCOS در قیاس با کوره بلندهای فعلی اروپا، به طور خلاصه نشان داده شده است.

جدول ۴. عملکرد اقتصادی و زیست محیطی تکنولوژی TGR–BF در قیاس با فرایندهای رایج تولید چدن خام در اروپا [۱۲۳ تا ۱۲۵].

	Current EU average BF	TGR-BF configuration	HIsarna	ULCORED
Production capacity (Mt HM/yr)	0.5–5.0	0.5–5.0	0.5–1.0	0.5–1.0
Economic aspects				
CAPEX				
-Greenfield	100%	105%	75%	200%-no CCS
-Brownfield	–	25%	65%	
OPEX (incl. energy, excl. depreciation costs)	100%	120%	90%	80–90%-no CCS

*HM= hot metal (or pig-iron). Notes: the proportions should be interpreted as relative scores, as the performance of the reference average blast furnace is set at 100%. The other data are absolute figures.

جدول ۴ عملکرد اقتصادی و زیست محیطی تکنولوژی TGR-BF در قیاس با فرایندهای رایج تولید چدن خام در اروپا [۱۲۳ تا ۱۲۵].

در خصوص نشر CO_2 اگر مقایسه‌ای با معیار قبلی EU ETS (معادل ۱۴۶۰ kg CO_2 eq./ton HM) داشته باشیم، شاهد عملکرد مثبت کلیه تکنولوژی‌های ULCOS هستیم.

به نظر می‌رسد فرایند HIsarna بدون استفاده از کک، مزایای اقتصادی بهتری در مقایسه با فرایندهای کوره بلند فعلی دارد حتی اگر کوره بلند از تکنولوژی بازیافت گاز خروجی بهره‌مند باشند [۱۲۳و۱۲۶].

جدول ۵. جزئیات پروژه ULCOS [۱۲۷].

	ULCOS I	ULCOS II
Start Date	2004-09-01	2010
Project Cost	35280915 euro	N/B
Contract Type	Integrated Project	N/B
End Date	2010-08-31	2050
Project Status	Completed	Going on
Project Funding	19996966 euro	N/B

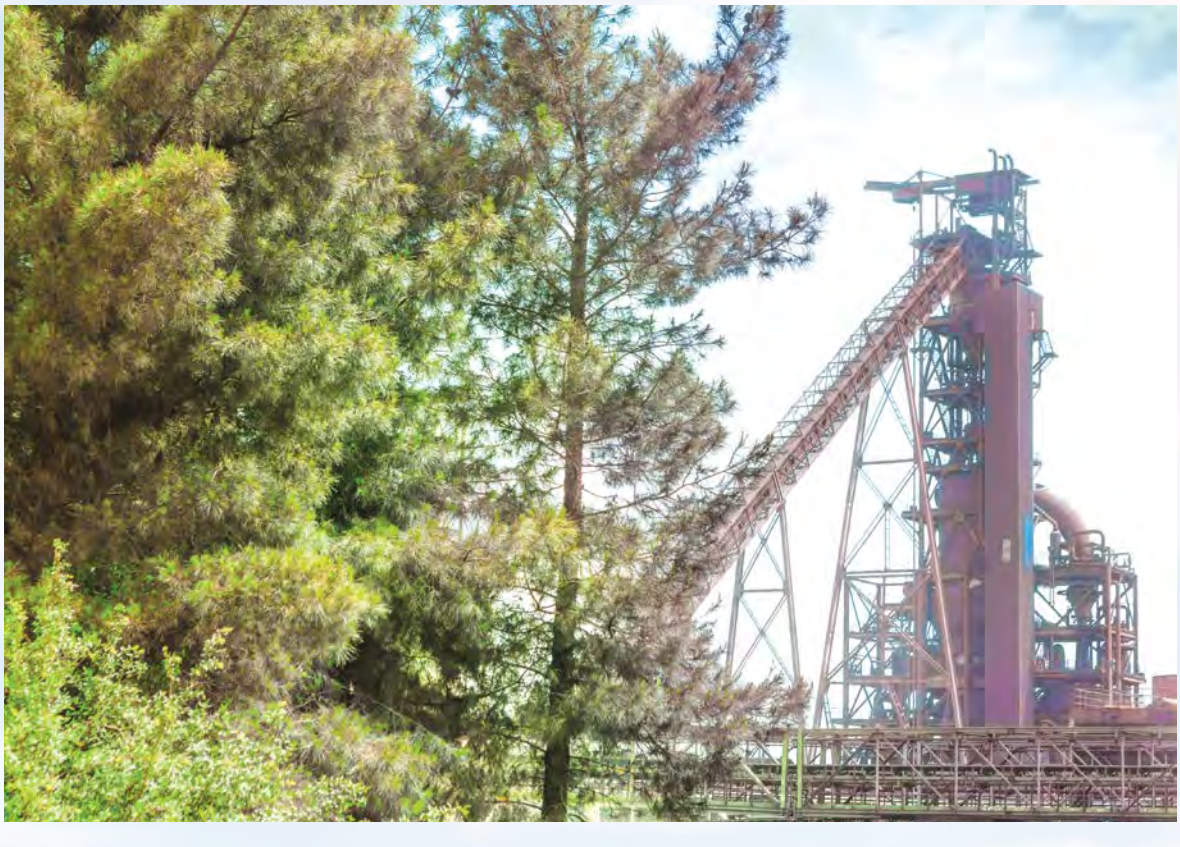
N/B: not available.

جدول ۶. وضعیت به روز رسانی شده ULCOS [۱۳].

ULCOS	TGR-BF	HIsarna	ULCORED	ULCOWIN
Characteristics	Revamped BF	Green field	Revamped DRI or green field Natural gas	Green field
Fuel	Coal and sustainable biomass	Coal and sustainable biomass	Natural gas	Electricity
Phase	1.5 t/h pilot tests demonstration under way	8 t/h pilot plant startup	1 t/h pilot plant to be erected in 2013	Laboratory

جدول شماره ۵ هزینه پروژه‌ها و سرمایه‌گذاری صورت گرفته برای تکنولوژی‌های تعریف شده در قالب ULCOS را نشان می‌دهد. این برنامه در هر دو فاز از سرمایه گذار خصوصی و دولتی بهره برده است. در فاز اول ۶۰٪ هزینه‌ها توسط کنسرسیم ULCOS و ۴۰٪ دیگر توسط کمیسیون اروپا ساپورت شده است. سهم سرمایه‌گذاری خصوصی و دولتی در فاز دوم هنوز اعلام نشده است [۱۲۷].

جدول ۶ وضعیت بروز رسانی شده برنامه ULCOS را نشان می‌دهد. به دلیل حجم بالای سرمایه‌گذاری در این برنامه، همواره چالش‌هایی مبنی بر عدم بازده و کارایی لازم طرح‌ها مطرح بوده است ولی سوال اصلی این است که چگونه قرار است این تکنولوژی‌های انقلابی در مقیاس های تولید کنونی و با صرفه اقتصادی جایگزین فرایندهای رایج و متعارفی همچون کوره بلند شوند.

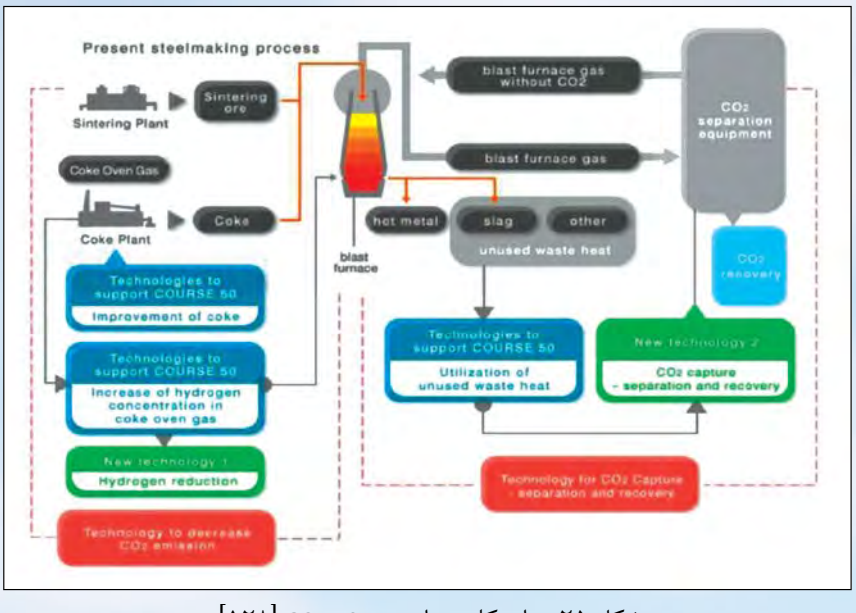


۶-۲) برنامه COURSE 50 در ژاپن

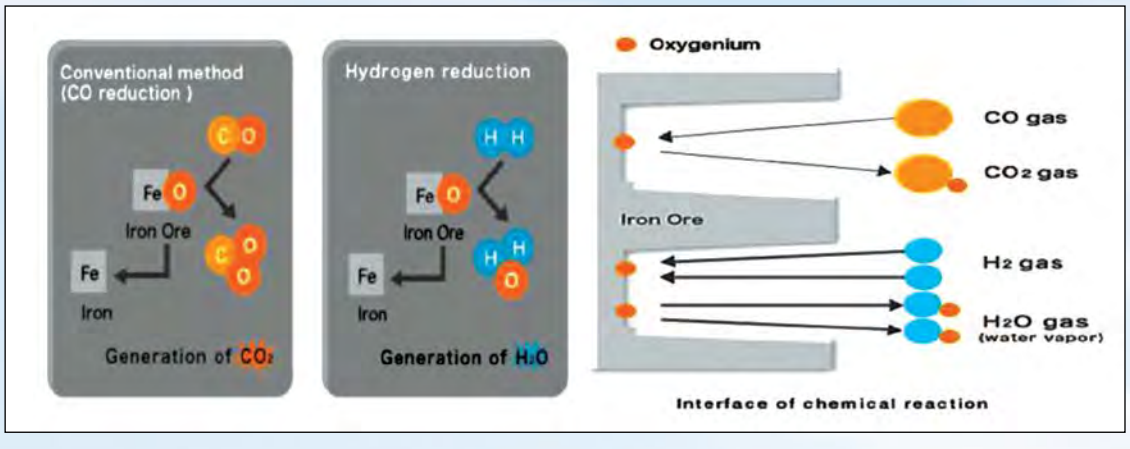
برنامه COURSE 50 در سال ۲۰۰۷ توسط نخست وزیر وقت ژاپن به صنایع و دستگاه‌های ذیربط ابلاغ شده است. رسالت این برنامه ارائه تکنولوژی‌های تولید فولاد با مصرف بهینه انرژی است تا علاوه بر توسعه اقتصادی، اهداف مرتبط با حفاظت از محیط زیست نیز برآورده گردد. به طور مشخص هدف این برنامه توسعه تکنولوژی برای کاهش نشر CO_2 از فرایندهای کوره بلند تا ۳۰٪ و بکارگیری همزمان فرایندهایی نظیر جمع آوری، جداسازی و بازیابی CO_2 از گاز خروجی کوره بلند است. طبق برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته تکمیل طرح‌ها در مقیاس صنعتی تا سال ۲۰۳۰ و انتقال تکنولوژی تا سال ۲۰۵۰ صورت می‌پذیرد [۱۲۸و۱۲۹].

در شکل ۲۵ نمای کلی این برنامه نشان داده شده است. اساساً برنامه COURSE 50 بر سه استراتژی کلی استوار است. واکنش هیدروژن با سنگ آهن استراتژی اول و کلیدی COURSE 50 است. در این فرایند CO_2 توسط آب تولید شده از واکنش هیدروژن و CO حذف می‌شود. این آب باعث فرونشستن غبار حاصل از فرایند نیز می‌شود، بنابراین می‌توان این روش تولید فولاد را سازگار با محیط زیست تلقی نمود [۱۳۰].

در فرایندهای رایج فولادسازی، CO_2 از واکنش سنگ آهن با CO تولید می‌شود. این در حالیست که در احیای سنگ آهن با H_2 به جای CO_2 آب تولید می‌شود و در عین حال سرعت واکنش نیز نسبت به روش‌های معمول بالاتر است (شکل ۲۶). نکته مهم دیگر بالاتر بودن سرعت نفوذ مولکول H_2 در سنگ آهن در مقایسه با مولکول CO است (حدود ۵ برابر). دلیل این امر اندازه کوچکتر مولکول H_2 نسبت به CO است. این مزیت در سرعت نفوذ می‌تواند نرخ احیای سنگ آهن در کوره بلند را به نحو چشمگیری افزایش دهد (شکل ۲۶) [۱۳۲].



شکل ۲۵. نمای کلی برنامه COURSE 50 [۱۲۸].



شکل ۲۶. مکانیزم احیای هیدروژن و سرعت واکنش گازهای H_2 و CO [۱۳۱].

1- CO_2 Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50

استراتژی دوم برنامه ازدیاد میزان هیدروژن گاز کک (COG) از طریق شکست (ریفرم) گاز کک سازی و استفاده مجدد از آن در کوره بلند است. این فرایند به شکل مؤثری منجر به کاهش نشر CO_2 ناشی از کوره کک سازی می‌شود. مضاف بر این با انتخاب یک افزودنی سینترسازی با کیفیت بالا، کیفیت ذوب، میزان نرم شوندگی، نفوذپذیری هوا و قابلیت انبساط سینترها بهبود می‌یابد [۱۳۳].

استراتژی سوم جمع آوری، جداسازی و بازیابی CO_2 از گاز خروجی کوره بلند است. در این خصوص یک واحد آزمایشی با نام CAT۳۰ احداث شده که می‌تواند روزانه ۳۰ تن CO_2 را جمع آوری کند و پایین‌ترین سطح مصرف انرژی حرارتی در دنیا را نیز دارد [۱۳۴].

این برنامه کماکان در فاز آزمایشگاهی قرار دارد. چالش جدی که این برنامه با آن روبروست محدودیت منابع گاز طبیعی در ژاپن است. بر این اساس تأمین مقادیر زیاد هیدروژن با قیمت مناسب امری دشوار به نظر می‌رسد. نهایتاً مشکل اصلی این برنامه مانند اتحادیه اروپا انتقال تکنولوژی است.

۶-۳) برنامه POSCO در کره جنوبی

۶-۳-۱) هدف، استراتژی و برنامه اجرایی POSCO

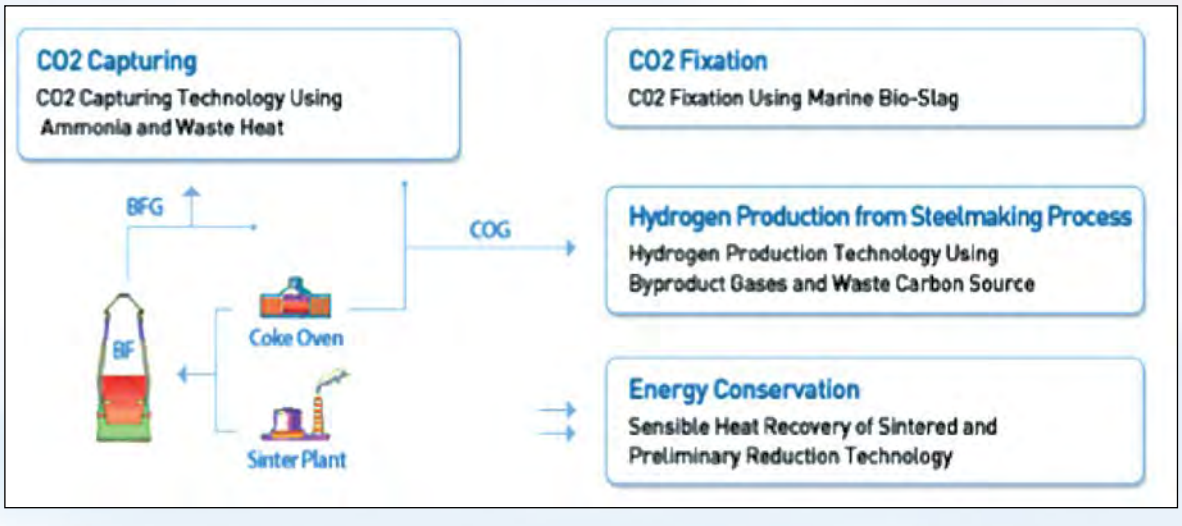
کاهش مصرف انرژی، توسعه تکنولوژی‌های مبتکرانه برای کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای در فرایندهای فولادسازی همراه با پروژه‌های موسوم به CDM [1] اهداف اصلی برنامه POSCO را تشکیل می‌دهند. این برنامه از سه استراتژی کلی پیروی می‌کند: (۱) توسعه تکنولوژی فولادسازی با مصرف کربن کم (فرایند FINEX)، (۲) توسعه CCS در فولادسازی، (۳) احیای سنگ آهن با هیدروژن در فرایند آهن سازی (جدول ۷) [۱۳].

۶-۳-۲) چارچوب تکنولوژی کاهش CO_2 در برنامه POSCO

POSCO همواره در حال توسعه همزمان فرایندهای فولادسازی یکپارچه با مصرف انرژی بهینه و فرایندهای جمع آوری و جداسازی CO_2 است. در این برنامه یک چارچوب تکنولوژی چهار مرحله‌ای به تصویب رسیده است: (۱) جمع آوری و جداسازی CO_2 با آمونیاک و

جدول ۷. اهداف، استراتژی و برنامه‌های اجرایی POSCO [۱۳۵].

Goal	Secure global climate change leadership
Strategy	1. Reduce greenhouse gas emission in the workplace 2. Reduce Social greenhouse gas emission 3. Climate change policy cooperation
Execution Plan	1.1 Carbon Management System operation 1.2 Adopt energy recovery & curb energy use 1.3 CO_2 reduction innovative technology development 2.1 Renewable energy CDM project promotion 2.2 Indirect CO_2 reduction through spreading of high-function steel 3.1 IISI Sectoral Approach participation 3.2 Asia-Pacific Partnership Steel TF participation 3.3 Voluntary agreement for energy reduction ('04–'08 target 1.04 million TOE) 3.4 TF of KISA for UNFCCC



شکل ۲۷. چارچوب آخرین دستاوردهای تکنولوژی کاهش CO_2 در برنامه POSCO [۱۳۵].

1- Clean Development Mechanism

حرارت تلف شده، (۲) تثبیت CO_2 با استفاده از زیست-سرباره‌های دریایی[1]، (۳) تکنولوژی تولید هیدروژن با استفاده از محصولات جانبی گازی و منابع کربن تلف شده از فرایند فولادسازی و (۴) بازیافت حرارتی سنگ آهن سینتر شده و تکنولوژی احیای مقدماتی [۱۳۵]. هدف میان مدت POSCO افزایش غلظت هیدروژن در محصولات جانبی گازی برای احیای سنگ آهن است [۵۷]. احیای سنگ آهن با هیدروژن خالص فرایند بسیار تمیزتری است و هدف بلند مدت POSCO محسوب می‌شود. در حال حاضر منبع تولید هیدروژن که به لحاظ اقتصادی به صرفه باشد و نشر CO_2 کمی داشته باشد در دسترس نیست [۱۳۶]. با اینکه برنامه کاهش کربن کره جنوبی برنامه بزرگی محسوب نمی‌شود ولی با تاثیر فراوان و با دستیابی به نتایج عملی خوبی به پیش می رود و مسیر توسعه آن با چالش‌هایی مشابه با برنامه‌های ژاپن و اتحادیه اروپا روبروست.

۶-۴) برنامه AISI در ایالات متحده آمریکا

برنامه AISI توسط تعدادی از دانشگاه‌های رده بالای ایالات متحده آمریکا سازمان‌دهی شده است. AISI یک برنامه تحقیق و توسعه بلند مدت با ریسک بالاست که هدف آن استفاده از منابع انرژی پاک و توسعه تکنولوژی‌های جمع‌آوری و جداسازی CO_2 است [۱۳۷]. در قالب این برنامه بررسی دو نوع فرایند آهن سازی بدون کربن در دستور کار قرار دارد: (۱) پروژه الکترولیز اکسید مذاب (MOE)[2] که توسط MIT در سال ۲۰۰۵ توسعه داده شده است. هدف این پروژه حذف کامل فرایندهای کوره بلند و کک سازی، کاهش نشر CO_2 و تولید مقادیر عظیم اکسیژن با ارزش تجاری است [۱۳۸و۱۳۹]، (۲) پروژه Hydrogen Flash Smelting که توسط دانشگاه یوتا از سال ۲۰۰۸ در حال پیگیری است. در این فرایند به جای کک در کوره بلند از هیدروژن، گاز طبیعی، زغال سنگ یا ترکیبی از آن‌ها استفاده می‌شود [۱۴۰]. در سال ۲۰۱۱ اولین نتایج این پروژه در قالب یک طرح آزمایشگاهی اجرا شد و محصول آن با موفقیت در مشعل های مخصوص گرمایشی به کار گرفته شد.

اعضای تیم AISI همچنین موفق به توسعه تکنولوژی جدیدی در عرصه آهن سازی به نام Paired Straight Hearth Furnace شده‌اند که مصرف انرژی پایین و بهره‌وری بالایی دارد. این فرایند می‌تواند هم از ضایعات فولادسازی و هم از مواد اولیه خام برای تولید آهن استفاده نماید. در این فرایند از زغال سنگ به جای کک استفاده می‌شود. پیش بینی می‌شود این تکنولوژی بتواند طی ۵ سال آینده به مرحله تجاری سازی برسد [۱۴۱].

۶-۵) برنامه‌های دیگر

همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، کشورهایی نظیر استرالیا، برزیل و تایوان هم برنامه‌های کاهش نشر CO_2

1- Marine Bio-Slag
2- Molten Oxide Electrlysis

دارند. استرالیا به طور مشخص در حال فعالیت بر روی دو پروژه در این زمینه است: (۱) استفاده از زیست توده‌ها به عنوان ماده سوختی برای کوره بلند که فرایندی بدون کربن بوده و نشر CO_2 آن صفر است، (۲) فرایند بازیافت انرژی حرارتی سرباره‌های مذاب توسط گرانوله سازی خشک در کوره بلند.

پروژه‌ای دیگری که در کشور برزیل در حال پیگیری است تکنولوژی احیای ذوبی کربن زیست توده نام دارد و هدف آن کاهش انتشارات ناشی از سوخت‌های فسیلی است.

در تایوان شرکت Chinese Steel پروژه‌ای در دست اقدام دارد که در آن از زیست توده‌ها به جای زغال سنگ در فرایند RHF [1] استفاده می‌شود [۱۴۲].

در چین به عنوان بزرگترین تولید کننده فولاد جهان برنامه مشخصی برای کاهش نشر CO_2 وجود ندارد [۱۱۵]. این کشور تنها از برخی تکنولوژی‌های صرفه جویی در مصرف انرژی مانند کوئنچ خشک در کک سازی، بازیافت حرارتی گاز کنورتور و بازیافت حرارتی ضایعات سینتر سازی استفاده می‌کند. البته این تکنولوژی‌ها در اتحادیه اروپا و آمریکا قدیمی محسوب شده و بالغ بر ۲۰ سال است که مورد استفاده قرار گرفته اند. اخیراً تکنولوژی جذب سطحی CO_2 جدیدی در شرکت Bao Steel چین در حال توسعه است که جذب سطحی با سرباره فولاد نام دارد و می‌تواند سالانه ۲۲۰ kt گاز CO_2 خروجی از کوره دوار آهک پزی را جذب نماید. همچنین شرکت آهن و فولاد Anshan در چین از تکنولوژی جدید TGR-BF استفاده می‌کند (جدول ۸) [۱۴۳و۱۴۴].

۸) انتخاب تکنولوژی و رویکردها برای کاهش نشر CO_2

امروزه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنایع آهن و فولاد به امری چالش برانگیز و پر هزینه تبدیل شده است. معضلات مربوط به گرمایش زمین و تغییرات آب و هوایی عذر موجهی برای معطوف شدن توجه این صنایع به استفاده از تکنولوژی‌های کاهش نشر CO_2 تلقی می‌شود. در عین حال پروژه‌های افزایش راندمان مصرف انرژی دیگر به تنهایی جوابگوی نیاز صنایع در حوزه حفاظت از محیط زیست نیستند. به بیان دیگر صنایع آهن و فولاد چاره‌ای جز ارائه راهکارهای فنی و تکنولوژیکی در این خصوص ندارند [۱۴۵و۱۴۶]. آمار رو به رشدی از تحقیقات و مطالعات به منظور درک بهتر تکنولوژی‌های موجود و ارتقاء مبتکرانه آنها در راستای نیل به اهداف زیست محیطی تعریف شده در حال شکل گیری است [۱۴۷ تا ۱۵۱].

۸-۱) استراتژی‌های انتخاب تکنولوژی

استراتژی انتخاب تکنولوژی برای کاهش نشر CO_2 می‌تواند از شرکتی به شرکت دیگر حتی در یک حوزه فعالیت مشابه متغیر باشد. هر شرکتی معمولاً با تعداد زیادی از گزینه‌های استراتژیک مواجه است که برای درک مدیریتی از ریسک‌ها و فرصت‌های پیش روی شرکت لازم به نظر می‌رسد [۱۵۲]. این سبک و سنگین کردن‌ها در مرحله انتخاب تکنولوژی می‌تواند منجر به ایجاد استراتژی‌های متنوعی گردد [۱۴۵]. در سال ۲۰۱۳ محققی به نام Li [۱۵۳] چارچوبی را برای انتخاب تکنولوژی و فرایند یکپارچه سازی مطرح کرد که شامل سه مرحله است: تعریف تکنولوژی‌های بالقوه، ارزیابی تکنولوژی و نهایتاً انتخاب تکنولوژی. برای این منظور وی از تکنیک‌های ارزیابی کمی نظیر ارزیابی چرخه حیات یا تحلیل سود و زیان بر اساس تأثیرات زیست محیطی و اقتصادی بهره گرفت تا بتواند عملکرد تکنولوژی‌های مختلف را مورد سنجش قرار دهد.

جدول ۸. خلاصه‌ای از برنامه‌های آخرین دستاوردهای کاهش CO_2 به همراه اهداف و نتایج بدست آمده [۱۳۵،۱۴۲،۱۴۴].

Programs	Involving	Aim & Target	Best result
AISI – technology roadmap programme1 (US)	AISI and the US Department of Energy's (Doe), Office of Industrial Technology	Program designed to (1) increase energy efficiency, (2) increase competitiveness of North American steel industry, (3) improves the environment	(1) Suspension Hydrogen Reduction of Iron Oxide Concentrate; (2) Molten Oxide Electrolysis
POSCO CO_2 Breakthrough Framework (Korea)	POSCO, RIST, POSLAB, POSTECH	Under framework contains six projects: (1) Pre-reduction & heat recovery of hot sinter, (2) CO_2 absorption using ammonia solution, (3) Bio-slag utilization for the restoration of marine environments, (4) Hydrogen production using COG and wastes, (5) Iron ore reduction using hydrogen-enriched syngas, and (6) Carbon-lean FINEX process.	(1) CO_2 absorption using ammonia solution, (2) Carbon lean FINEX process
COURSE50 (Japan)	Japanese Iron and Steel Federation (JISF), Japan Ministry of Economy, Trade and Industry	Development of innovative technologies for solving global environmental problems including R&D projects, public relations activities and promotes industry/institute cooperation.	(1) Scenario-making for global warming mitigation; (2) CO_2 separation, capture and storage; (3) CO_2 fixation by plants and its effective use
ULCOS – Ultra-Low Carbon dioxide Steelmaking-1&2 (EU)	All major EU steel companies, energy and engineering partners, research institutes and universities, European Commission	Cooperative R&D initiative to research rapid CO_2 emissions reduction from steel production including process science, engineering, economics and foresight studies in climate change.	(1) Top Gas Recycling Blast Furnace with CCS; (2) ISARNA with CCS; (3) Advanced Direct Reduction with CCS; (4) Electrolysis

1- Rotary Hearth Furnace

۷-۲) گزینه های تکنولوژی

گزینـه تکنولـوژی عبارتسـت از یـک سـری از تکنولوژی‌هـای متنـوع کـه یک شـرکت متناسـب بـا اهـداف زیسـت محیطی خـود انتخـاب می‌کنـد و بـه اجـرا می‌گـذارد. بـر اسـاس مطالعـات گذشـته [۱۵۱، ۱۵۴ و ۱۵۵] محققـی بـه نـام Lee [۱۴۵] یـک روش دسـته بنـدی جدیـد بـرای گزینه‌هـای تکنولـوژی پیشـنهاد داده اسـت. وی دو نـوع اسـتراتژی تعریف کـرد: اسـتراتژی جریـان مـاده و انـرژی، و اسـتراتژی میـزان رادیـکال بـودن نـوآوری تکنولـوژی بـرای تولیـد پایـدار و پـاک. بـر اسـاس ایـن چارچـوب ۵ گزینـه تکنولـوژی وجـود دارد کـه هرکـدام نمـادی از اسـتراتژی شـرکت بـرای کاهـش آلاینده‌هاسـت (شـکل ۲۸).

بـر اسـاس جریـان مـاده و انرژی سـه منطقه داخلـی، فرایندی و خروجـی تعریـف می‌شـود. همچنیـن بـر اسـاس میـزان رادیـکال بـودن طـرح، دو نوع نـوآوری پیوسـته و انقلابی تعریف می‌شـود. در صـورت نیـاز بـه حداقـل تغییـرات تکنولوژیـک بر اسـاس قواعـد موجـود و عملکـرد سیسـتم، بـه نوآوری‌هـای پیوسـته نیـاز خواهـد بـود. در عـوض نوآوری‌هـای انقلابـی زمانـی ضـروری اسـت کـه تغییـرات اساسـی در سیسـتم‌ها، فرایندهـا و محصـولات مـد نظـر باشـد. اغلـب نوآوری‌هـای تکنولـوژی در صنعـت آهـن و فـولاد از نـوع پیوسـته هسـتند.

۷-۳) رویکردها در کاهش انتشارات گازی

بـر اسـاس تحقیقـات گذشـته تعـدادی از تکنولوژی‌هـا و رویکردهـا بـرای کاهـش گازهـای گلخانـه‌ای شناسـایی و بصـورت گزینه‌هـای تکنولـوژی بـه شـرح زیـر تقسـیم بنـدی شـده‌اند (جـدول ۹):

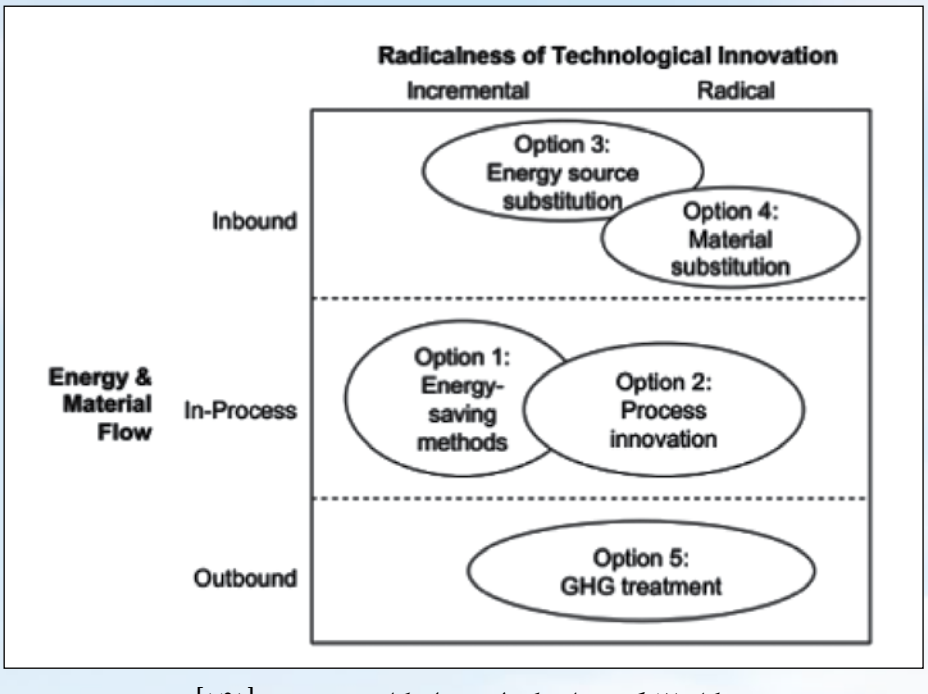
(۱) انـواع تکنولوژی‌هـا و برنامه‌هـای کاهـش آلودگـی و بهینه‌سـازی مصـرف انـرژی در فرایندهـای تولیـدی کـه در گزینـه صرفه‌جویـی انـرژی قـرار دارنـد. ایـن گزینـه در صنایـع انـرژی بـری ماننـد آهـن و فـولاد از بالاتریـن درجـه اولویـت برخـوردار اسـت. بهبـود راندمـان فرایندهـا، بهینـه سـازی سیسـتم‌های انـرژی و بازیافـت انـرژی حرارتـی تلـف شـده نیز در ایـن گزینـه تکنولـوژی قـرار می‌گیرنـد [۱۵۵].

(۲) نـوآوری انقلابـی در تکنولـوژی کـه در گزینـه نـوآوری فراینـد قـرار می‌گیـرد. بـه نقـل از متخصصیـن صنعتـی، برای دسـتیابی بـه کاهـش انتشـارات گازی بـه میـزان ۸۰ تـا ۹۵ درصـد، تغییـرات بنیادیـن و انقلابـی در تکنولـوژی تولیـد صنایـع انـرژی بـر و آلاینـده‌ای همچـون آهـن و فـولاد الزامـی اسـت [۱۵۵].

(۳) گزینـه تکنولـوژی جایگزینـی منابـع انـرژی بـر روی جایگزیـن کـردن مـواد سـوختی متعـارف بـا منابـع غیـر کربنـی پـاک (هیـدروژن، زیسـت سـوخت‌ها و زیسـت انرژی‌هـا) و تجدیـد پذیـر (انـرژی خورشـیدی، انـرژی بـادی و غیـره) متمرکـز اسـت.

(۴) گزینـه تکنولـوژی جایگزینـی مـواد بـر روی تغییـر خـواص مـواد و فرمـول محصـولات متمرکـز اسـت و هـدف آن جایگزیـن کـردن مـواد بـدون کربـن بـه جـای مـواد کربـن‌دار اسـت [۱۴۵].

(۵) گزینـه تصفیـه گازهـای گلخانـه‌ای کـه هـدف آن جلوگیـری از ورود آلاینده‌هـای مضـر بـه اتمسـفر بـا روش‌های جمـع آوری و ذخیره‌سـازی اسـت.



شکل ۲۸. گزینه‌های تکنولوژی برای کاهش نشر CO_2 [۱۴۵].

۹) موانع و مراحل بکارگیری تکنولوژی‌ها

سرعت فراگیر شدن و امکان استفاده بودن یک تکنولوژی به ظرفیت عملیاتی آن و در دسترس بودن زیرساختهای مورد نیاز آن بستگی دارد. پایدار بودن و مزایای رقابتی داشتن از عوامل اصلی در افزایش سرعت پخش آن تکنولوژی به شمار می روند. برای انتقال سریع تکنولوژی حذف موانع زیر الزامی است [۱۶۲]:

- در صورت عدم وجود اطلاعات واضح و قانع کننده در خصوص یک محصول، سرمایه گذار قانع نخواهد شد
- هزینه بسیار بالای سرماه گذاری
- خریدار میزان ریسک را بالاتر از مقدار واقعی می‌بیند
- هزینه تکنولوژی‌های جایگزین به درستی تخمین زده نشده است و دسترسی بازار به منابع مالی دشوار است
- مقررات سخت‌گیرانه و ناکارآمد که با شرایط جدید همخوانی ندارد
- ظرفیت ناکافی برای معرفی و مدیریت تکنولوژی‌های جدید
- عدم درک منافع اقتصادی تکنولوژی‌های جدید

مراحل مختلف توسعه و بکارگیری تکنولوژی‌های جدید به صورت شماتیک در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

۱۰) نتیجه گیری و پیشنهادات آینده

صنعت آهن و فولاد با مصرف ۵٪ از کل انرژی جهان بزرگترین مصرف کننده انرژی در بخش صنایع تولیدی محسوب می‌شود. این صنایع ۴ تا ۵ درصد کل نشر CO_2 با منشأ غیرطبیعی را به خود اختصاص داده است. بر این اساس افزایش حداکثری راندمان مصرف انرژی برای جبران نشر CO_2 در این صنعت الزامیست. بازیافت انرژی حرارتی از منابع مختلف در صنایع آهن و فولاد مانند جریان‌های گازی (BFG، COG، BOF gas و offgas)، سرباره مذاب و محصول داغ راه حل مناسبی برای کاهش مؤثر مصرف انرژی و نشر CO_2 به شمار می‌آید.

از آنجایی که کوره بلند بزرگترین منبع آلاینده در میان دیگر فرایندهای یک مجتمع یکپارچه تولید فولاد است، استفاده از مواد خام با کیفیت و جایگزین کردن مواد سوختی متعارف (مانند زغال سنگ و گاز طبیعی) با گزینه‌های کم کربن یا بدون کربن (مانند زیست توده و گازهای فرایندی) تأثیر بسزایی در کنترل نشر CO_2 خواهد گذاشت.

با اینحال رویکردهای بلند مدت مانند توسعه و بکارگیری تکنولوژی‌های نو در عرصه تولید آهن و فولاد، نتایج موثرتری در زمینه کاهش نشر CO_2 به همراه خواهد داشت. آخرین دستاوردهای تکنولوژی در زمینه کاهش نشر CO_2 در صنعت فولاد مشتمل بر استفاده از منابع پاک و تجدیدپذیر انرژی، استفاده از تکنولوژی‌های جمع‌آوری و ذخیره کربن یا CCS، بازیابی گاز خروجی کوره بلند (TGRBF)، فرایندهای جدید تولید آهن و فولاد

جدول ۹. گزینه‌های تکنولوژی برای کاهش انتشارات گازی

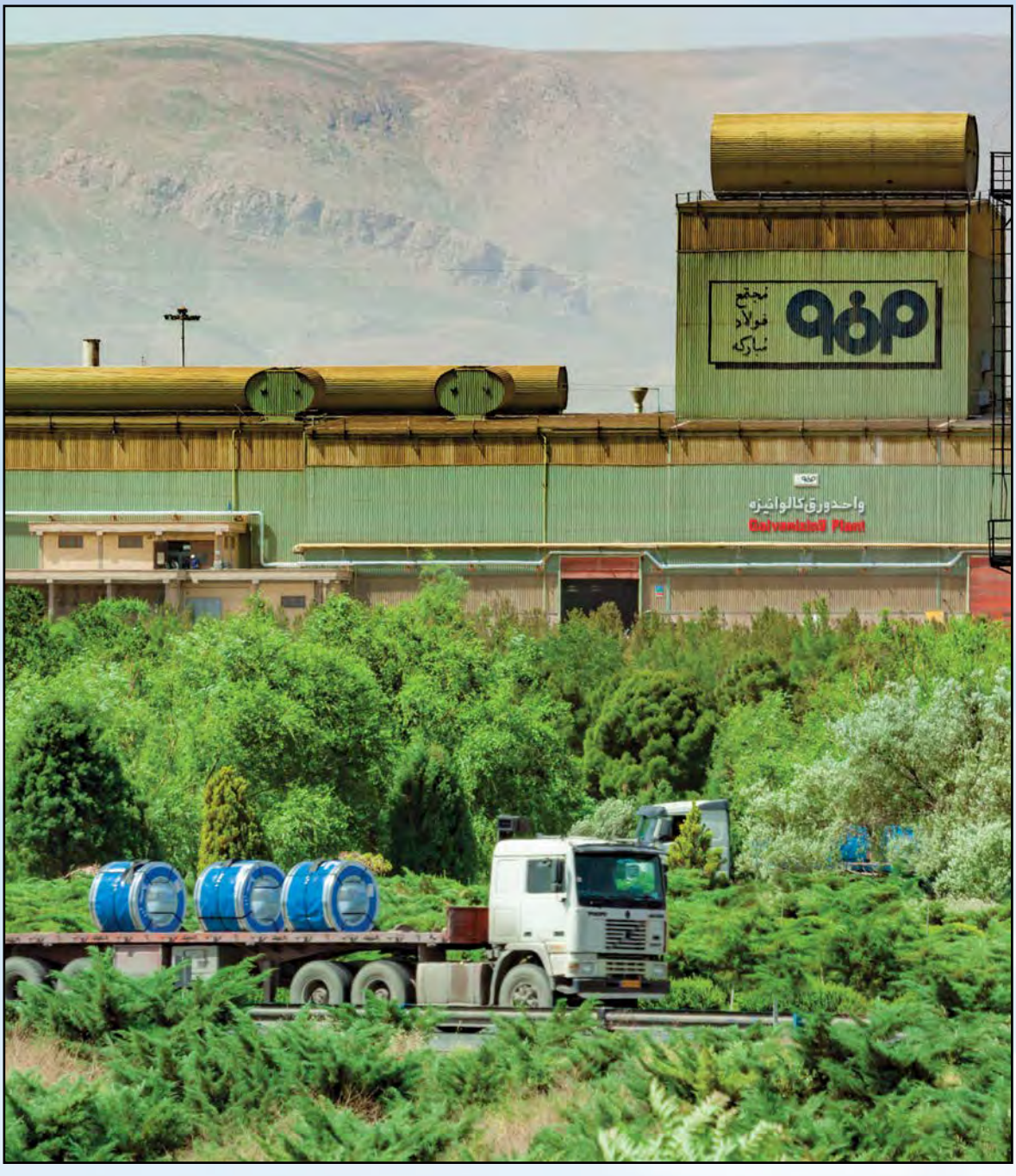
Technology options	Related research & technologies	Reference
Energy-saving methods	✓ Energy efficiency programs ✓ Better housekeeping ✓ Plant retrofitting ✓ Energy recovery	[156,157,152,158]
Process innovation	✓ Product redesigns ✓ Process improvements ✓ Breakthrough technologies (ultra-low-CO_2 steelmaking technology)	[151,159,152,160]
Energy source substitution	✓ Renewable energy sources ✓ Substitute of less carbon-intensive fuels	[157,161]
Material substitution	✓ Product redesigns ✓ System innovation ✓ Raw material substitution	[157,159,151]
CO_2 emission capture & storage	✓ CO_2 separation, capture & utilization	[157,161]

جدول ۱۰. مراحل بکارگیری تکنولوژی

R&D	Demonstration	Deployment	Commercialization
Find out to overcome technical barriers and minimize costs. Commercial outcomes are highly uncertain, especially in the early stages.	The technology is demonstrated in practice. Costs are high. External (including government) funding may be needed to finance part or all of the costs of demonstration.	Successful technical operation, but possibly in need of support to overcome cost or non-cost barriers. With increasing deployment, technology learning will progressively decrease costs	The technology is cost competitive in any or all markets, (diffusion) either on its own terms, or where necessary, supported by government intervention (e.g. to value externalities, such as costs of pollution).

(نظیـر فرایندهـای احیـای مسـتقیم و فرایندهـای احیـای ذوبـی)، آهـن سـازی پایـه هیدروژنـی، الکترولیـز سـنگ آهـن و فولیـد فـولاد بـر پایـه زیسـت تودههـا هسـتند. در حـال حاضـر فاکتورهـای متعـددی هسـتند کـه اسـتفاده از زیسـت تـوده هـا در تولیـد اهـن و فـولاد را بـرای کاهـش نشـر CO_2 محـدود مـی کننـد، بنابرایـن اسـتفاده از تکنولوژی هـای CCS در مجتمعهـای یکپارچـه تولیـد فـولاد بـر پایـه زغـال سـنگ راه حـل عملـی تـری بـه حسـاب مـی آینـد.

در پایـان پیشـنهاد مـی گـردد تحقیقـات آینـده در زمینـه توسـعه کارایـی و بـه کار گیـری تکنولـوژی هـای CCS در بخشهـای مختلـف آلاینـده صنایـع فـولاد و نیـز توسـعه تکنولـوژی هـای جدیـد بـرای بازیابـی حـرارت موجـود در گازهـای و مـواد خروجـی دمـا بـالا در ایـن صنعـت باشـند که ایـن امـور تـا بـه امـروز بـه دلایـل مختلـف تکنولوژیکـی یـا اقتصـادی فراگیـر نشـده انـد. در نهایـت بایـد ذکـر گـردد کـه نمـی تـوان یـک رویکـرد یـا تکنولـوژی را بـه تنهایی بـه عنوان بهتریـن راه حـل جامـع بـرای حـل مشـکلات مرتبـط بـا نشـر فـراوان CO_2 در صنعـت فـولاد ارائـه کـرد بلکـه اصـولا بایـد مجموعـه ای از ایـن راه حلهـا را بـرای مـوارد خـاص طراحـی و در نظـر گرفـت. همچنیـن فاصلـه گرفتـن از فرایندهـای تولید کنونـی و مرسـوم و توسـعه فراگیـر فرایندهـا و تکنولـوژی های جدیـد بـا کاهـش یـا حـذف نشـر CO_2 هنـوز نیازمنـد تحقیق و توسـعه بسـیار زیـاد بـر روی ایـن فرایندهـا بـرای برطـرف کـردن چالـش هـای پیـش روی ایـن مسـیرها مـی باشـد.



مراجع:

[1] Helle H., Towards sustainable iron and steelmaking with economic optimization; 2014.
[2] Huitu K, Helle H, Helle M, Kekkonen M, Saxén H, Optimization of steelmaking using fastmet direct reduced iron in the blast furnace, ISIJ Int 2013;53:2038–46.
[3] Dhunna R, Khanna R, Mansuri I, Sahajwalla V, Recycling waste bakelite as an alternative carbon resource for iron making applications, ISIJ Int 2014;54:613–9.
[4] IEA. Energy technology perspectives 2010 scenarios and strategies to 2050. Paris, France; 2010. p.650.
[5] Mandil C, Tracking industrial energy efficiency and CO_2 emissions. Paris: IEA; 2007.
[6] Pal P, Gupta H, Kapur D, Carbon mitigation potential of Indian steel industry, Mitig Adapt Strateg Glob Change, 2014; 19:1–12.
[7] Wårell L, Trends and developments in long-term steel demand—the intensity-of-use hypothesis revisited. Resource Policy 2014; 39:134–43.
[8] Bellevrat E, Menanteau P, Introducing carbon constraint in the steel sector: ULCOS scenarios and economic modeling. RevMétall 2009; 106:318–24.
[9] Association WS. World steel in figures 2013, World Steel Association http:// www.worldsteelorg/dms/internetDocumentList/bookshop/WSIF_2011/document/World; 2013.2.
[10] Pauliuk S, Milford RL, Muller DB, Allwood JM, The steel scrap age, Environ Sci Technol 2013; 47:3448–54.
[11] Pardo N, Moya JA. Prospective scenarios on energy efficiency and CO_2 emissions in the European Iron & Steel industry. Energy 2013; 54:113–28.
[12] Milford RL, Pauliuk S, Allwood JM, Muller DB. Environ Sci Technol. The roles of energy and material efficiency in meeting steel industry CO_2 targets, 2013; 47:3455–62.
[13] Fu J-x, Tang G-h, Zhao R-j, Hwang W-s. Carbon reduction programs and key technologies in global steel industry. J Iron Steel Res, Int 2014; 21:275–81.
[14] Advanced Manufacturing Office (AMO). U.S. Department of Energy (U.S. DOE); 2014.
[15] Åhman M, Nikoleris A, Nilsson LJ. Decarbonising Industry in Sweden—an assessment of possibilities and policy needs. Lund: Lund University; 2012.
[16] Fischedick M, Marzinkowski J, Winzer P, Weige lM. Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. J Clean Prod 2014.
[17]Association WS. World steel in figures 2011. World Steel Association http:// www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/WSIF_2011/document/World; 2011.2.
[18] Fallot A, Saint-André L, LeMaire G, Laclau J-P, Nouvellon Y, Marsden C, etal. Biomass sustainability, availability and productivity. Rev Métall, 2009; 106:410–8.
[19] Birat J-P. CCS and the Steel Industry. International conference on CCS regulation for the EU and China; 2009.
[20] Birat J, Maizière-lès-Metz D. Steel sectoral report-contribution to the UNIDO roadmap on CCS1-fifth draft. Global Technology Roadmap for CCS in Industry, United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria; 2010.
[21] International energy agency: worldwide trends in energy use and efficiency; 2008.p.32.
[22] Matsumiya T. Steelmaking technology for a sustainable society. Calphad 2011; 35:627–35.
[23] Association WS. Steel processing overview. Brussels: World Steel Association; 2014.
[24] Napp T, Gambhir A, Hills T, Florin N, Fennell P. A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonizing energy-intensive manufacturing industries. Renew Sustain Energy Rev 2014; 30:616–40.
[25] Hasanbeigi A. Emerging energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction technologies for the iron and steel industry; 2014.
[26] Association WS. Steel processing routes. Steeluniversity.org.
[27] Association WS. Sustainable steel: at the core of a green economy.Brussels, Belgium; 2012.
[28] Association WS. Fact sheet energy, world steel fact sheet; 2008.
[29] IEA. World Energy Balance International Energy Agency; 2012.
[30] Carpenter A. CO_2 abatement in the iron and steel industry. Paris, France: IEA Clean Coal Centre; 2012.
[31] Tanaka N. Energy Technology Perspectives 2008–scenarios and strategies to 2050. Paris: International Energy Agency (IEA); 2008.
[32] Taylor P. Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios & strategies to 2010; 2050.
[33] Sato M, Yamamoto T, Sakurai M. Recent progress in iron making technology for CO_2 Mitigation at JFE steel.
[34] Hasanbeigi A, Arens M, Price L. Alternative emerging iron making technologies for energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction: a technical review. Renew Sustain Energy Rev 2014; 33:645–58.
[35] Birat JP, Maizières-lès-Metz AGRAD. Steel sectoral report. Contribution to the UNIDO roadmap on CCS, fifth draft. France; 2010.p.65.
[36] Xu CC, Cang D-Q. A brief overview of low CO2 emission technologies for iron and steelmaking. J Iron Steel Res, Int 2010; 17:1–7.
[37] Morfeldt J, Nijs W, Silveira S. The impact of climate targets on future steel production—an analysis based on a global energy system model. J Clean Prod 2014; 69:1–268.
[38] Germeshuizen LM, Blom P. A techno-economic evaluation of the use of hydrogen in a steel production process, utilizing nuclear process heat. Int J Hydrogen Energy 2013; 38:10671–82.
[39] Fick G, Mirgaux O, Neau P, Patisson F. Using biomass for pig iron production: a technical, environmental and economical assessment. Waste Biomass Valoriz 2014; 5:43–55.
[40] Suopajärvi H, Pongrácz E, Fabritius T. Bio reducer use in Finnish blast furnace iron making—analysis of CO2 emission reduction potential and mitigation cost. Appl Energy 2014;124:82–93.
[41] Goldemberg J. How biomass could work in the iron and steel industry. Energy for Sustainable Development 1996; 3(2):55.
[42] Krupnick Alan J Kopp RJ, Hayes Kristin, Roeshot Skyler. The natural gas revolution: critical questions for a sustainable energy future. Resources for the Future (RFF); 2014.
[43] Steel Industry Analysis Brief. Energy efficiency and renewable energy, industrial technologies program. USA: U.S. Department of Energy.
[44] EERE. U.S. energy requirements for aluminum production: historical perspective, theoretical limits and current practices. Washington, USA; 2007.

[45] Villar A, Arribas JJ, Parrondo J. Waste-to-energy technologies in continuous process industries. Clean Technol Environ Policy 2012; 14:29–39.
[46] ITP. Waste heat recovery. Technologies and opportunities in U.S. industry. Washington, U.S.: Department of Energy; 2008.
[47]Zhang X, Zhou S. The prospect of sensible heat recovery of blast furnace slag. The 7th China iron and steel annual meeting proceedings; 2009.
[48] Das B, Prakash S, Reddy P, Misra V. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. Resource Conserv Recycl 2007; 50:40–57.
[49] Kuroki T, Kabeya K, Makino K, Kajihara T, Kaibe H, Hachiuma H, etal. Thermoelectric generation using waste heat in steel works. J Electr Mater 2014; 43:2405–10.
[50] Agency IE. Tracking industrial energy efficiency and CO_2 emissions: In support of the G8 plan of action. Energy indicators. France; 2007.
[51] Li L, Morishita K, Takarada T. Light fuel gas production from nascent coal volatiles using a natural limonite ore. Fuel 2007; 86:1570–6.
[52] Razzaq R, Li C, Zhang S. Coke oven gas: availability, properties, purification, and utilization in China. Fuel 2013; 113:287–99.
[53] Diemer P, Killich H-J, Knop K, Lungen HB, Reinke M, Schmole P. Potentials for utilization of coke. 'Oven gas in integrated iron and steel works. 2nd international meeting on iron making and the 1st international symposium on iron ore; 2004.p.433–46.
[54] Johansson MT, Söderström M. Options for the Swedish steel industry— energy efficiency measures and fuel conversion. Energy 2011; 36:191–8.
[55] Coke Oven Gas; 2011.
[56] Zhang H, Wang H, Zhu X, Qiu Y-J, Li K, Chen R, et al. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry. Appl Energy 2013; 112:956–66.
[57] POSCO. Carbon report 2013. South Korea; 2013.
[58] Qin Y, Lv X, Bai C, Qiu G, Chen P. Waste heat recovery from blast furnace slag by chemical reactions. JOM 2012; 64:997–1001.
[59] Tiberg N. Heat recovery from molten slag. A new Swedish granulation technique. Conference heat recovery from molten slag. A new Swedish granulation technique; 1981.p.1837–42.
[60] Shun L. Heat recovery from B.F. Slag at home and abroad. Ind Heat 2009; 5:23–5.
[61] Nakada T, Nakayama H, Fuji K, Iwahashi T. Heat recovery in dry granulation of molten blast furnace slag. Energy Dev Jpn 1983; 55:287–309.
[62] Yoshinaga M, Fujii K, Shigematsu T, Nakata T. Dry granulation and solidification of molten blast furnace slag. Trans Iron Steel Inst Jpn 1982; 22:823–9.
[63] Yoshida HNY, Nakatani G, Anazi T, Sato H. The technology of slag heat recovery at NKKSEAISI conference of energy utilization in the iron and steel industry; 1984.
[64] Ando J, Onoue H, Nakahara T, Ichimura S, Kondo M. Development of slag blast granulating plant characterized by innovation of the slag treatment method, heat recovery and recovery of slag as resources. Mitsubishi Heavy Ind Tech Rev 1985; 22:136–42.
[65] Youwu Z. Comprehensive sensible heat recovery technologies of blast furnace slag developed in Japan. Angang Technol 1990:10.
[66] Pickering S, Hay N, Roylance T, Thomas G. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast-furnace slag. Iron making Steelmaking 1985; 12:14–20.
[67] Mizuochi T, Akiyama T, Shimada T, Kasai E, YagiJ-i. Feasibility of rotary cup atomizer for slag granulation. ISIJ Int 2001; 41:1423–8.
[68] Xie D, Jahanshahi S, Norgate T. Dry granulation to provide a sustainable option for slag treatment. Sustainable mining conference Kalgoorlie WA (Australia); 2010.p.22–8.
[69] Purwanto H, Akiyama T. Mathematical modeling of molten slag granulation using a spinning disk atomizer (SDA). International conference of Scandinavian simulation society; 2005.
[70] Kashiwaya Y, In-Nami Y, Akiyama T. Development of a rotary cylinder atomizing method of slag for the production of amorphous slag particles. ISIJ Int 2010; 50:1245–51.
[71] Kasai E, Kitajima T, Akiyama T, Yagi J, Saito F. Rate of methane-steam reforming reaction on the surface of molten BF Slag: for heat recovery from molten slag by using a chemical reaction. ISIJ Int 1997; 37:1031–6.
[72] Shimada T, Kochura V, Akiyama T, Kasai E, Yagi J-i. Effects of slag compositions on the rate of methane steam reaction; 2000.
[73] Purwanto H, Akiyama T. Hydrogen production from bio gas using hot slag. Int J Hydrogen Energy 2006; 31:491–5.
[74] Hongxiong L. Investigation of coal gasification using blast furnace molten slag as heat carrier. Energy Conserv 2004; 6.
[75] Yang H. A new one-step technology of mineral wool production by using the sensible heat of industrial BF slag high-efficiently.
[76] Qin Y-l, Qiu G-b, Bai C-g, Lv X, Deng Q-y. Development of studies on sensible heat recovery from blast furnace slag by chemical methods. China Metall 2011; 21:1–7.
[77] Demailly D, Quirion P. European emission trading scheme and competitiveness: a case study on the iron and steel industry. Energy Econ 2008; 30:2009–27.
[78] Arasto A, Tsupari E, Kärki J, Pisilä E, Sorsamäki L. Post-combustion capture of CO_2 at an integrated steel mill–Part I: technical concept analysis. Int J Green h Gas Control 2013; 16:271–7.
[79] Birat JP, Maizières-lès-Metz AGRAD, France. Contribution to the UNIDO roadmap on CCS1–fifth draft. Steel sectoral report. Amsterdam; 2010.p.65.
[80] Blomen E, Hendriks C, Neele F. Capture technologies: improvements and promising developments. Energy Procedia 2009; 1:1505–12.
[81] Leung DY, Caramanna G, Maroto-Valer MM. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. Renew Sustain Energy Rev 2014; 39:426–43.
[82] Gielen D. CO_2 removal in the iron and steel industry. Energy Convers Manag 2003; 44:1027–37.
[83] Tseitlin MA, Lazutkin SE, Styopin GM. A flowchart for iron making on the basis of 100% usage of process oxygen and hot reducing gases injection. ISIJ Int 1994; 34:570–3.
[84] Davidson RM. Post-combustion carbon capture from coal fired plants: solvent scrubbing. London: IEA Clean Coal Centre; 2007.
[85] Tobiesen FA, Svendsen HF, Mejdell T. Modeling of blast furnace CO_2 capture using amine absorbents. Ind Eng Chem Res 2007; 46:7811–9.
[86] Cheng H-H, Shen J-F, Tan C-S. CO_2 capture from hot stove gas in steelmaking process. Int J Green h Gas Control 2010; 4:525–31.

[87] Zhu Q. CO_2 abatement in the cement industry. IEA Clean Coal Centre. CCC/184, London, UK: IEA; 2011.p.85.
[88] Yoon YNS, Jung S, Kim Y. K2CO3/hindered cyclic amine blend (SEFY-1) as a solvent for CO_2 capture from various industries. Energy Procedia 2011; 4:267–72.
[89] Rhee CH, KimJ Y, Han K, Ahn CK, Chun HD. Process analysis for ammonia-based CO_2 capture in iron making industry. Energy Procedia 2011; 4:1486–93.
[90] Kim JY, Han K, Chun HD. CO_2 absorption with low concentration ammonia liquor. Energy Procedia 2009; 1:757–62.
[91] POSCO. Carbon report-2013. South Korea; 2013.p.72.
[92] Federation JIaS. Technologies to capture, separate and recover CO_2. Japan Iron and Steel Federation (JISF); 2011.
[93] CRC for Green House Gas Technologies (CO_2CRC). Australia; 2014.
[94] Kuramochi T, Ramírez A, Turkenburg W, Faaij A. Techno-economic assessment and comparison of CO_2 capture technologies for industrial processes: preliminary results for the iron and steel sector. Energy Procedia 2011; 4:1981–8.
[95] Lie JA, Vassbotn T, Hägg M-B, Grainger D, Kim T-J, Mejdell T. Optimization of a membrane process for CO_2 capture in the steel-making industry. Int J Green h Gas Control 2007; 1:309–17.
[96] CO_2CRC. Fact sheets-Gas separation membranes. Australia Cooperative Research Centre for Green House Gas Technologies (CO2CRC).
[97] BJ. P. Carbon dioxide (CO_2) capture and storage technology in the iron and steel industry. Carbon dioxide (CO_2) capture, transport and industrial applications. Developments and innovation in carbon dioxide (CO_2) capture and storage technology, vol.1. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd.; 2010.
[98] Carpenter A. CO_2 abatement in the iron and steel industry. France IEA Clean Coal Centre; 2012.
[99] Duc NH, Chauvy F, Herri J-M. CO_2 capture by hydrate crystallization—a potential solution for gas emission of steel making industry. Energy Convers Manag 2007; 48:1313–22.
[100] Baciocchi R, Costa G, Polettini A, Pomi R. Accelerated mineral carbonation of steel slags.In: Proceedings of the first international slag valorization symposium. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven; 2010. p. 51–63.
[101] Richards VL, Peaslee K, Smith J. Geological sequestration of CO_2 by hydrous carbonate formation with reclaimed slag. Missouri University of Science and Technology, 215 ME Annex, 1870 Miners Circle, Rolla, MO 65409-1330; 2008.
[102] Eloneva S, Teir S, Salminen J, Fogelholm C-J, Zevenhoven R. Fixation of CO_2 by carbonating calcium derived from blast furnace slag. Energy 2008; 33:1461–7.
[103] Teir S, Eloneva S, Fogelholm C-J, Zevenhoven R. Dissolution of steelmaking slags in acetic acid for precipitated calcium carbonate production. Energy 2007; 32:528–39.
[104] Doucet FJ. Effective CO_2-specific sequestration capacity of steel slags and variability in their leaching behavior in view of industrial mineral carbonation. Miner Eng 2010; 23:262–9.
[105] Kunzler C, Alves N, Pereira E, Nienczewski J, Ligabue R, Einloft S, et al. CO_2 storage with indirect carbonation using industrial waste. Energy Procedia 2011; 4:1010–7.
[106] Fogelholm C-J, TT-M, Eloneva S. Reduction of CO_2 emissions and utilization of slag products by producing calcium-based products from carbonate-free slag products (Slag2PCCPlus).Helsinki, Finland, 2009. p. 314–23.
[107] Vehlow J. Air pollution control systems in WtE units: an overview. Waste Manag 2014; 37:58–74.
[108] CSE report.BlueScope Steel; 2011.
[109] Sustainable steel: at the core of a green economy: WorldSteelAssociation; 2012.
[110] Liu Z, Mao X, Tu J, Jaccard M. A comparative assessment of economic incentive and command-and-control instruments for air pollution and CO_2 control in China's iron and steel sector. J Environ Manag 2014; 144:135–42.
[111] Gu Y, Xu J, Keller AA, Yuan D, Li Y, Zhang B, et al. Calculation of water footprint of the iron and steel industry: a case study in Eastern China. J Clean Prod 2015; 92:274–81.
[112] Remus R., Roudier S., Aguado-Monsonet M.A., Sancho L.D. Best Available Techniques (BAT) reference document for iron and steel production: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: Integrated Pollution Prevention and Control: Publications Office; 2013.
[113] Mortier R, Block C, Vandecasteele C. Water management in the Flemish steel industry: the Arcelor Gent case. CleanTechnol Environ Policy 2007; 9:257–63.
[114] Nakaso K, Tanaka Y, Eshima S, Kobayashi S, Fukai J. Performance of a novel steam generation system using a water-zeolite pair for effective use of waste heat from the iron and steel making process. ISIJ Int 2015; 55:448–56.
[115] Guo Z, Fu Z. Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China. Energy 2010; 35:4356–60.
[116] Asssociation WS. FactSheet: breakthrough technologies.World Steel Asssociation. Brussels; 2009.p.2.
[117] Afanga K, Mirgaux Olivier, Patisson Fabrice. Assessment of top gas recycling blast furnace: a technology to reduce CO2 emissions in the steelmaking industry. Carbon management technology conference; 2012.
[118] Top gas recycling. ULCOS; 2014.
[119]ULCOS. HIsarna smelter technology. Ultra-Low CO_2 Steelmaking; 2014.
[120] Assefa G, Björklund A, Eriksson O, Frostell B. ORWARE: an aid to environmental technology chain assessment. J Clean Prod 2005; 13:265–74.
[121]ULCOS. ULCORED. ULCOS; 2014.
[122]Staal Bm. ULCOS=Ultra Low CO_2 Steelmaking.Bouwenmet Staal, Zoetermeer; 2004.
[123] Croezen H, Korteland M. Technological developments in Europe: a long-term view of CO_2 efficient manufacturing in the European region: report: CE Delft; 2010.
[124] Meijer K. ULCOS, Ultra low CO_2 steelmaking. Presentation given at 25 September 2008.
[125] Link J. IRMA – Flow sheet model – Examples of application IJmuiden: Corus Research Development & Technology.In: Proceedings of the 4th Ulcos seminar; 2008.
[126] Birat J-P. Carbon dioxide (CO_2) capture and storage technology in the iron and steel industry. Woodhead Publishing Limited, Cambridge; 2010.
[127] ULCOS. Structure and financing.
[128] Federation TJIaS. Outline of COURSE50. Japan: The Japan Iron and Steel Federation; 2014.
[129] Holroyd C. Asian Perspect 2009; 33:73–96.

[130] Taylor M, Tam C, Gielen D. Energy efficiency and CO_2 emissions from the global cement industry Int Energy Agency 2006.
[131] FederationTJIaS.TechnologytoreductionCO2 emissions. Japan: The Japan Iron and Steel Federation; 2014.
[132] Tanaka K, Nishida K, Akizuki W, Komori T. Combustor development for low calorie fuel firing with COG. J-Jpn Inst Energy 2006; 85:355.
[133] Kormori SST, Yamagami N, Kitauchi Y, Akizuki. W. Technical review, 44. Japan: Mitsubishi Heavy Industry Ltd; 2007.
[134] Goto K, Okabe H, Chowdhury FA, Shimizu S, Fujioka Y, Onoda M. Development of novel absorbents for CO_2 capture from blast furnace gas. Int J Green h Gas Control 2011; 5:1214–9.
[135] POSCO. Climate Change Policy POSCO; 2014.
[136] Climate change.In: Edenhofer O, Pichs Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, BaumI, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx JC, editors. Mitigation of climate change.contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. United Kingdom and NewYork, NY, USA: Cambridge;2014.
[137] Figueroa JD, Fout T, Plasynski S, McIlvried H, Srivastava RD. Advances in CO_2 capture technology—The US Department of Energy's carbon sequestration program. Int J Greenh Gas Control 2008; 2:9–20.
[138] Kim H, Paramore J, Allanore A, Sadoway D. The influence of electrolyte basicity on the performance of an iridium anode for the electrolysis of molten iron oxide.J Electrochem Soc 2011; 158:E101–5.
[139] Pinegar HK, Moats MS, Sohn HY. Processs imulation and economic feasibility analysis for a hydrogen-based novel suspension iron making technology. Steel Res Int 2011; 82:951–63.
[140] Institute AIaS. CO_2 breakthrough fact sheets. USA: American Iron and Steel Institute 2014.
[141] AISI. Profile of the American Iron and Steel Institute, USA; 2013.
[142] Fu J-X, Zhang C, Hwang W-S, Liau Y-T, Lin Y-T. Exploration of biomass char for CO_2 reduction in RHF process for steel production. Int J Greenh Gas Control 2012; 8:143–9.
[143] Bonenfant D, Kharoune L, Sauvé S, Hausler R, Niquette P, Mimeault M, et al. Molecular analysis of carbon dioxide adsorption processes on steel slag oxides. Int J Greenh Gas Control 2009; 3:20–8.
[144] Rozhan AN, Cahyono RB, Yasuda N, Nomura T, Hosokai S, Akiyama T. Carbon deposition of bio tar from pine saw dust by chemical vapor in filtration on steelmaking slag as a supplementary fuel in steel works. Energy Fuels 2012; 26:3196–200.
[145] Lee S-Y. Existing and anticipated technology strategies for reducing green- house gas emissions in Korea's petrochemical and steel industries. J Clean Prod 2013; 40:83–92.
[146] Gielen D, Moriguchi Y, Yagita H. CO_2 emission reduction for Japanese petrochemicals. J Clea Prod 2002; 10:589–604.
[147] Tseng M-L, Divinagracia L, Divinagracia R. Evaluating firm's sustainable production indicators in uncertainty. Comput Ind Eng 2009; 57:1393–403.
[148] Lin Y, Cheng H-P, Tseng M-L, Tsai JC. Using QFD and ANP to analyze the environmental production requirements in linguistic preferences. Expert Syst Appl 2010; 37:2186–96.
[149] Tseng M-L, Chiu AS. Evaluating firm's green supply chain management in linguistic preferences. J Clean Prod 2013; 40:22–31.
[150] Poel Ivd. The transformation of technological regimes. Res Policy 2003; 32:49–68.
[151] Rynikiewicz C. The climate change challenge and transitions for radical changes in the European steel industry. J Clean Prod 2008; 16:781–9.
[152] Jeswani HK, Wehrmeyer W, Mulugetta Y. How warm is the corporate response to climate change? Evidence from Pakistan and the UK Bus Strategy Environ 2008; 17:46–60.
[153] Li L, Lu Y, Shi Y, Wang T, Luo W, Gosens J, et al. Integrated technology selection for energy conservation and PAHs control in iron and steel industry: methodology and case study. Energy Policy 2013; 54:194–203.
[154] Lee S-Y, Rhee S-K. From end-of-pipe technology towards pollution preventive approach: the evolution of corporate environmentalism in Korea. J Clean Prod 2005; 13:387–95.
[155] Moors EH. Technology strategies for sustainable metals production systems: a case study of primary aluminium production in The Netherlands and Norway. J Clean Prod 2006; 14:1121–38.
[156] Korhonen J, Snäkin J-P. Analysing the evolution of industrial ecosystems: concepts and application. Ecol Econ 2005; 52:169–86.
[157] Korhonen J, Huisingh D, Chiu AS. Applications of industrial ecology—an overview of the special issue. J Clean Prod 2004; 12:803–7.
[158] Schultz K, Williamson P. Gaining competitive advantage in a carbon- constrained world: strategies for European business. Eur Manag J 2005; 23:383–91.
[159] Weinhofer G, Hoffmann VH. Mitigating climate change—how do corporate strategies differ? Bus Strategy Environ 2010; 19:77–89.
[160] Kolk A, Pinkse J. Business responses to climate change: identifying emergent strategies. California Manag Rev 2005; 47:6–20.
[161] Tjan W, Tan RR, Foo DC. A graphical representation of carbon footprint reduction for chemical processes. J Clean Prod 2010; 18:848–56.
[162] Nataly Echevarria Huaman Ruth, XiuJun Tian. Energy related CO_2 emissions and the progresson CCS projects: a review. Renew Sustain Energy Rev 2014; 31:368–85.
[163] Aswathanarayana U, Harikrishnan T, Sahini KMT. Deployment and role of technology learning. Green energy: technology, economics, and policy. CRC Press, Florida;2010.

نیازهای حال حاضر، پیشرفت‌های اخیر و مسیر حرکت در آینده در خصوص برنامه فولادسازی با تولید بسیار ناچیز CO_2 و مصرف انرژی بهینه

گردآوری و ترجمه:
تحقیق و توسعه شرکت فولاد مبارکه

چکیده:

با صرف ۵٪ از کل انرژی جهان، صنعت آهن و فولاد بزرگترین مصرف کننده انرژی در دنیا محسوب می شود. همچنین ۶٪ از کل انتشار CO_2 تولید بشر به این صنعت اختصاص دارد. در اروپا برنامه ای ملقب به ULCOS [1] وجود دارد که هدف آن ترویج فولادسازی با تولید بسیار ناچیز گاز CO_2 است. در این برنامه جدیدترین دستاوردهای تکنولوژی برای کاهش مؤثر انتشار CO_2 مورد بررسی قرار گرفته اند که عبارتند از: (۱) کوره بلند با قابلیت بازیابی گازهای خروجی (TGR-BF)، (۲) فرایند احیای ذوبی جدید با نام HIsarna، (۳) فرایند احیای مستقیم پیشرفته با نام ULCORED و (۴) فرایند الکترولیز سنگ آهن با نامهای ULCOWIN و ULCOLYSIS. همچنین، تکنولوژی‌هایی نظیر فولادسازی پایه هیدروژنی یا استفاده از زیست توده‌ها [2] (سوخت‌های زیستی) بعنوان عامل احیا، پشتیبان فرایندهای ذکر شده در راستای کاهش انتشار CO_2 به حساب می‌آیند. هدف این مقاله تحلیل و ارزیابی میزان رشد اینگونه تکنولوژی‌ها در صنعت آهن و فولاد و همچنین میزان پیشرفت فعالیت‌های آزمایشگاهی حال حاضر در پروژه های ULCOS I , II است. برای این منظور اطلاعات به روز شده از طیف وسیعی از منابع با هم مقایسه شده‌اند. همچنین در این مقاله به معرفی آخرین دستاوردهای تکنولوژی در راستای کاهش تولید CO_2 در اروپا پرداخته خواهد شد که انتظار می‌رود وارد مرحله تولید پایلوت یا صنعتی شده باشند. نتایج بررسی حاکی از آنست که بکارگیری تکنولوژی CCS [3] در کارخانجات فولادسازی پایه زغال سنگ می‌تواند انتشار گاز CO_2 را تا ۸۰٪ کاهش دهد. این در حالیست که فولادسازی بر پایه هیدروژن یا زیست توده‌ها هم باوجود چالش‌های اساسی پیش‌رو دورنمای جذابی را به نمایش می‌گذارند. در انتها ارزیابی مقایسه‌ای میان برنامه ULCOS و دیگر دستاوردهای جهانی در خصوص کاهش تولید CO_2 صورت گرفته است.

1- Ultra-Low Carbon Dioxide (CO_2) Steelmaking
2- Biomass
3- Carbon Capture and Storage

۱. مقدمه

گرم شدن کره زمین یکی از وخیم‌ترین معضلات حال حاضر بشر است. به منظور مبارزه با تغییرات آب و هوایی، اهداف بلند پروازانه‌ای ازجمله هدف ۲۰-۲۰-۲۰ یا نقشه راه انرژی ۲۰۵۰ [۲] در اروپا تعیین شده اند[۱]. در برنامه ۲۰-۲۰-۲۰ [۱] هدف کاهش ۲۰ درصدی انتشار CO_2 در مقایسه با سال ۱۹۹۰ و همچنین کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی‌های اصلی و جایگزین کردن آنها با انرژی‌های تجدیدپذیر است. نقشه راه انرژی ۲۰۵۰ مسیر اروپا را برای کاهش ۸۰ تا ۹۵ درصدی تولید گازهای گلخانه ای تا سال ۲۰۵۰ در مقایسه با سال ۱۹۹۹ ترسیم می‌کند [۲ و ۳].

در سال ۲۰۰۸ سامانه مبادله آلاینده ها [۳] وابسته به اتحادیه اروپا بر اساس طرح استراتژیک تکنولوژی انرژی [۴] این اتحادیه اقدام به هدف گذاری برای توسعه تکنولوژی‌های پاک، بهینه و کم آلاینده در صنایعی نمود که جزء مصرف کنندگان عمده انرژی بودند [۴ و ۵]. صنعت آهن و فولاد یکی از بزرگ‌ترین مصرف کنندگان انرژی و همچنین یکی از بزرگ‌ترین نشردهندگان گاز CO_2 در دنیاست. عمده فرایندهای فولادسازی پایه زغال سنگی بوده و وابستگی شدیدی به سوخت‌های فسیلی مانند نفت و گازوییل دارند؛ لذا میزان انتشار گاز CO_2 قابل توجه است [۶]. سهم سالانه صنایع آهن و فولاد از تولید گاز CO_2 در دنیا حدود ۶٪ است [۷]. ۴/۷٪ از کل انتشارات گاز CO_2 اروپا (معادل ۱۸۲ میلیون تن) از صنعت فولاد بوده و ۲۷٪ از کل انتشارات گاز CO_2 دنیا مربوط به بخش تولید اتحادیه اروپاست [۸و۹]. به ازای هر تن فولاد، ۱/۸ تن گاز CO_2 تولید می‌شود و انرژی مورد نیاز برای تولید هر تن فولاد ۲۱ تا ۳۵/۵ گیگاژول برآورد می شود [۱۱]. دو روش اصلی برای تولید فولاد وجود دارد: (۱) استحصال آهن از سنگ آهن از طریق فرایند احیا، (۲) بازیافت قراضه فولاد از طریق فرایند ذوب. تکنولوژی های اصلی فراوری در تولید آهن، کوره بلند و کنورتور [۵] هستند که تولید ۹۵٪ آهن خام و ۷۰٪ فولاد دنیا را به خود اختصاص می‌دهند [۱۲]. ۵٪ از آهن جهان توسط فرایند احیا مستقیم (بصورت آهن اسفنجی) تولید می‌شود. کوره‌های قوس الکتریکی، قراضه یا ضایعات فولادی را مورد استفاده قرار می‌دهند. در این کوره ها قراضه فولاد یا آهن حاصل از فرایند احیای مستقیم (DRI) توسط نیروی الکتریکی ذوب می‌شود [۱۳ و ۱۴]. در فرایند آهن سازی به روش کوره بلند سنگ معدن (Fe_2O_3) حرارت دیده و آهن آن بصورت آهن خام مذاب استحصال می شود. در این شرایط به یک واکنش احیای مؤثر نیاز است تا بتواند اکسیژن را از سنگ آهن جدا کند. این امر با اضافه کردن یک عامل احیا کننده، معمولا کک، به کوره بلند محقق می شود. کربن با اکسید آهن واکنش داده و مونوکسید کربن تولید می کند که خود بعنوان عامل احیا، اکسید آهن را طی فرایندی احتراقی احیا می کند. در نهایت اکسیدهای آهن بصورت شیمیایی به آهن تبدیل می‌شوند که منجر به تولید مقادیر زیادی CO_2 و CO با عنوان گاز محصول جانبی یا گاز کوره بلند (BFG) می‌شود. واکنش‌های شیمیایی فرایند آهن سازی را می توان بصورت زیر نشان داد [۱۵]:

$$C + ½\ O_2 \longrightarrow CO$$

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

$$Fe_2O_3 + 3CO \longrightarrow 2Fe + 3CO_2$$

$$Fe + O_2 \longrightarrow 2FeO$$

$$Si + O_2 \longrightarrow SiO_2$$

$$2Mn + O_2 \longrightarrow 2MnO$$

$$2P + 5FeO \longrightarrow P_2O_5 + 5Fe$$

بنابراین واکنش‌های احیا در کوره بلند، واکنش‌های سوختن مواد کربنی (نرمه کک و غیره) و گازهای حاوی کربن مثل گازهای کوره بلند (B Gas)، کوره کک سازی (C Gas)، واحد سینتر و پیش گرمکن‌ها منجر به تولید مقادیر عظیمی از CO_2 می‌شود. بر این اساس کنترل و کاهش نشر گاز CO_2 در اینگونه صنایع مسئله‌ای ضروری به حساب می‌آید [۱۶]. در یک دهه گذشته تحقیقاتی تحت عنوان "برنامه عبور از دی اکسید کربن [۶]" در حال انجام بوده است (ULCOS [۷]، AIST [۸]، POSCO [۹]، COURSE50 [۱۰] و غیره) که هدف آنها توسعه روش‌هایی پایدار برای تولید آهن و فولاد با تکنولوژی پاک و عاری از کربن است [۱۷]. هدف، توسعه آخرین دستاوردهای تکنولوژی از جمله بازیافت گاز خروجی کوره بلند، احیای مستقیم در کوره قوس الکتریکی، الکترولیز سنگ آهن (که به آن Electrowinning هم گفته می شود)، گرفتن کربن حاصل از سوخت‌های فسیلی و جداسازی آن (CCS [۱۱]) و همچنین استفاده از زیست توده‌ها، هیدروژن و الکتریسیته به عنوان عوامل احیایی نو در فرایند احیا است [۴ و ۱۸]. از تمام این برنامه ها، ULCOS از گستردگی بیشتری برخوردار بوده و بودجه عظیمی در اختیار دارد. این برنامه کنسرسیومی از ۴۸ شرکت و ۱۵ سازمان اروپایی است و کمیسیون اروپا نیز از آن حمایت می کند. ULCOS متشکل از صنایع عمده فولادسازی اتحادیه اروپا، شرکای مهندسی آنها، مؤسسات تحقیقاتی و دانشگاه‌ها است [۱۹]. این برنامه به دو فاز ULCOS I در ۲۰۰۴ و ULCOS II در سال ۲۰۱۰ تقسیم می‌شود. این برنامه مستقل از رخدادهای جاری، به دنبال راه حل برای تهدیدهای ناشی از گرمایش زمین است. هدف اصلی از این پروژه عظیم کاهش حداقل ۵۰ درصدی نشر گاز CO_2 است. به عبارت دیگر تلاش می‌کند میزان

1- 20-20-20 Target
2- 2050 Energy Roadmap
3- EU Emission Trading System (EU-ETS)
4- EU Strategic Energy Technology Plan
5- Basic Oxygen Furnace
6- CO2 Breakthrough Program
7- Ultra Low CO2 Steelmaking (EU)
8- American Iron and Steel Institute with Technology Roadmap Program
9- CO2 breakthrough Framework (Korea)
10- CO2 Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 2050
11- Carbon Catch and Sequestration

CO_2 منتشر شده به ازای تولید هر تن فولاد را از ۲ تن به ۱ تن تقلیل دهد [۲۰]. همچنین این برنامه، در تلاش است تکنولوژی‌های بالقوه و امکانپذیر تولید فولاد با میزان بسیار ناچیز CO_2 را در مقیاس صنعتی بصورت پایدار باید توسعه دهد؛ به این معنی که سازگار با محیط زیست و اقتصادی بوده و به لحاظ اجتماعی قابل پذیرش باشد [۲۱ و ۲۲].

از ابتدای فاز دوم، ULCOS تصویری از کاهش نشر CO_2 از ۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰ ارائه داد. بر این اساس با روند فعلی، درصورتی که صنایع از بهترین تکنولوژی‌های پیشرفته و در دسترس زمان خود استفاده کنند، پیش بینی می‌شود تولید گاز CO_2 که متوسط جهانی آن ۱/۸ تن به ازای تولید هر تن فولاد در سال ۲۰۱۰ است تا سال ۲۰۵۰ کاهش یابد و به ۱/۱ تن به ازای تولید هر تن فولاد برسد. از طرف دیگر مطابق با سناریوی کربن کم (LC [1])، اگر در این بازه زمانی صنایع بتوانند از آخرین دستاوردهای تکنولوژی در زمینه کاهش تولید CO_2 استفاده کنند، تولید CO_2 به ۰/۲ تن به ازای تولید هر تن فولاد تنزل خواهد یافت. البته این به شرطی است که تکنولوژی‌های ذکر شده موجود باشد و سیاست گذاری‌ها بگونه ای تنظیم شده باشد که بتوان آنها را بکار گرفت. شکل ۱ وضعیت در سال ۲۰۱۰، نتیجه روند فعلی در سال ۲۰۵۰ و نتیجه سناریوی کربن کم در سال ۲۰۵۰ را نشان می‌دهد [۲۴-۲۷].

تا به حال هیچگونه مطالعه جامعی در خصوص ULCOS و ارزیابی مقایسه‌ای آن با دیگر برنامه‌های کاهش نشر CO_2 صورت نگرفته است، لذا در این مقاله سعی شده تحلیلی کلی از نقش بالقوه و بلند مدت این برنامه در اروپا ارائه شود. بعلاوه در این مقاله تلاش خواهد شد تا با درک بهتر از نقش تغییر تکنولوژی و نفوذ تکنولوژی‌های کربن کم و بهینه به لحاظ مصرف انرژی، روند پیشرفت در کاهش آلاینده‌ها تشریح گردد. بطور کلی سوالات زیر در این مقاله پاسخ داده خواهد شد:

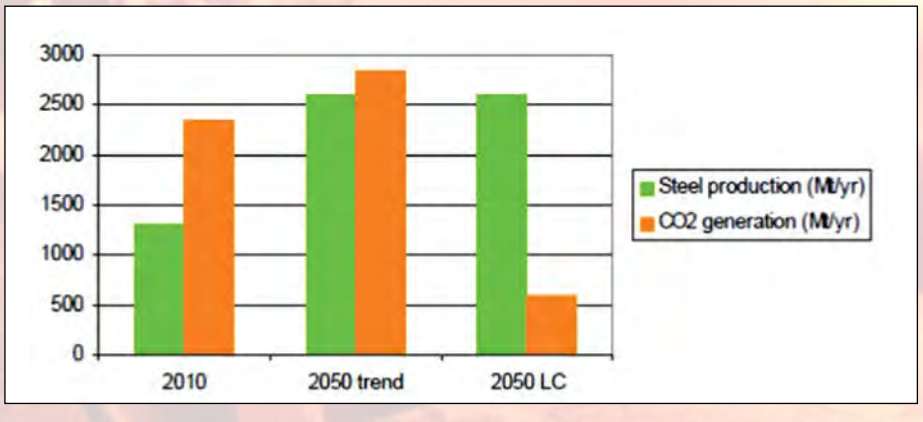
آخرین دستاوردهای تکنولوژی در برنامه ULCOS که می‌تواند بعنوان ابزاری برای کاهش نشر CO_2 در حوزه فولاد استفاده شود چیست؟ میزان رشد و تکامل تکنولوژی‌های CCS به اندازه‌ای هست که بتوانند بعنوان یک راه حل کارآمد در برابر دیگر راهکارها قد علم کنند؟ آیا مانعی بر سر راه اجرایی شدن این تکنولوژی‌ها در حوزه آهن و فولاد وجود دارد؟ چشم انداز آینده دیگر برنامه‌های کاهش نشر CO_2 چگونه است؟

این مقاله با تشریح مفهوم ULCOS در بخش ۲ شروع می شود. در بخش ۳ به ارائه چشم اندازها و اهداف آینده ULCOS پرداخته خواهد شد. آخرین دستاوردهای تکنولوژی در ULCOS و نتایج آزمایش‌های مربوط به آنها در بخش ۴ مورد بحث قرار می‌گیرد. بخش ۵ به کارکرد اقتصادی و محیط زیستی این تکنولوژی‌ها می-پردازد. در بخش ۶ مقایسه‌ای بین ULCOS و دیگر برنامه‌های مشابه انجام خواهد شد و نهایتاً در بخش ۷ و ۸، تحقیقات آینده، خلاصه و نتیجه گیری این مقاله ارائه خواهد شد. این مقاله برای مهندسین، محققین، شرکت‌های تولید فولاد، سیاستگذاران، سرمایه گذاران و دیگر نهادهای علاقه‌مند به احداث صنایع پاک و پایدار آهن و فولاد، مفید است.

۲. مفهوم ULCOS

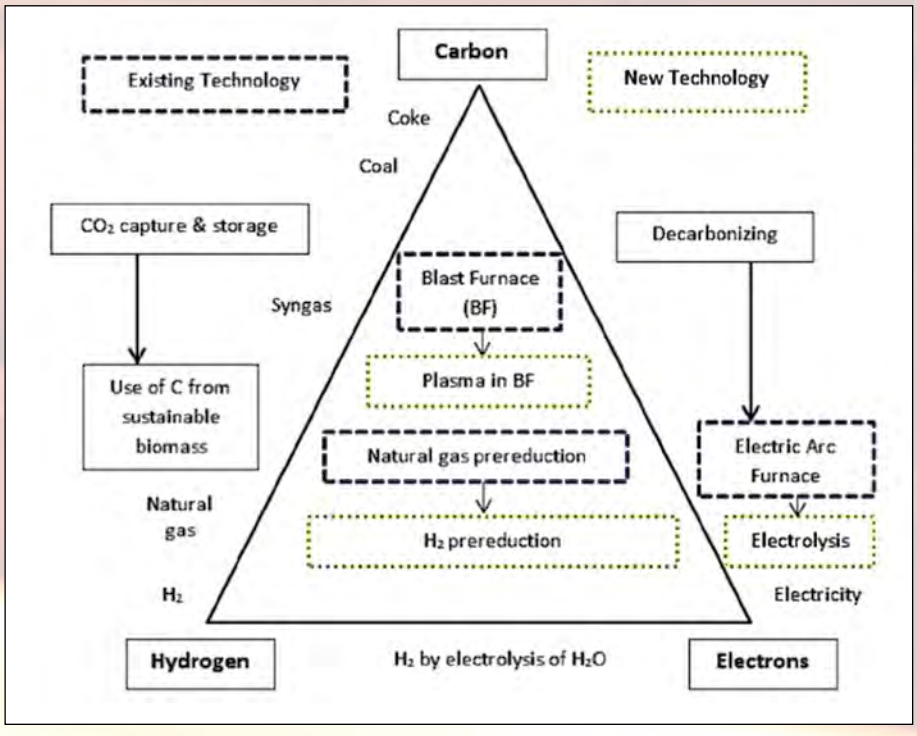
برنامه ULCOS، مفهومی در ارتباط با آخرین دستاوردهای تکنولوژی در زمینه کاهش نشر CO_2 را به شرح شکل ۲ پیشنهاد می‌دهد. در ماتریس مثلثی شکل ۲ نشان داده شده که چگونه می توان عامل احیا را از بین سه گزینه کربن، هیدروژن و الکترون انتخاب نمود. کلیه منابع موجود برای دستیابی به عوامل احیا روی اضلاع این مثلث درج شده‌اند. بعنوان مثال زغال سنگ روی ضلع هیدروژن-کربن در نزدیکی کربن و گاز طبیعی نزدیک هیدروژن قرار داده شده است. همچنین هیدروژن حاصل از الکترولیز آب بر روی ضلع هیدروژن-الکترون قرار دارد [۲۷].

تکنولوژی‌های فولادسازی موجود که در حال حاضر بیشتر از سوخت‌های فسیلی ازجمله کربن، گاز طبیعی، ترکیب کربن و هیدروژن و همچنین کوره قوس



شکل ۱. تجسمی از میزان نشر CO_2 در صنایع آهن و فولاد [۲۷]

1- Low Carbon



شکل۲. خط سیر برنامه ULCOS [۲۷]

الکتریکی استفاده می‌کنند در مستطیل‌های خط‌چین قرارگرفته‌اند. از طرف دیگر برای روش‌های تولید با CO_2 کم، برنامه ULCOS سه راهکار اصلی در نظر گرفته است: (۱) کربن‌زدایی که طبق آن هیدروژن در احیا با هیدروژن و الکتریسیته در فرایند الکترولیز سنگ آهن جایگزین زغال سنگ می‌شود، (۲) معرفی تکنولوژی CCS، (۳) استفاده از زیست توده های پایدار. این راه حل‌ها در مستطیل‌های نقطه‌چین سبز قرار گرفته اند [۲۸].

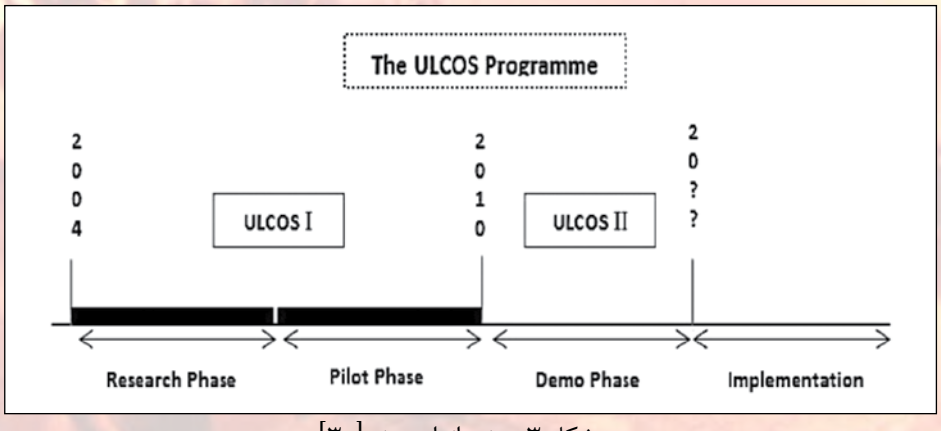
۳. چشم انداز و اهداف آینده ULCOS

فـاز مقدماتی برنامه تحقیقـات ULCOS هشـتاد روش مفهومی را توسـط مدلسـازی ریاضـی و آزمون‌هـای آزمایشـگاهی مـورد بررسـی قـرار داده اسـت. در ایـن بررسـی‌ها مـواردی همچـون میـزان مصـرف انـرژی، میـزان انتشـار گاز CO_2، هزینه‌هـای بهـره بـرداری، میـزان پایـداری فراینـد و سـازگاری آن بـا محیـط زیسـت مـورد ارزیابـی قـرار گرفتنـد [۲۹]. از ایـن میـان شـش روش بـرای تحقیقـات گسـترده‌تر و تجاری‌سـازی انتخـاب شـدند. در جـدول ۱ پیشـرفت ایـن طرح‌هـا و هـدف گذاری‌هـای صـورت گرفتـه تشـریح شـده اسـت.

در آخریـن جلسـه ESTEP [۳] تصمیـم گرفتـه شـد کـه برنامـه ULCOS I پیشـروی بیشـتری داشـته باشـد. بـر ایـن اسـاس برنامـه ULCOS I بایـد تـا سـال ۲۰۱۰ تکمیـل شـده و پـس از آن برنامـه ULCOS II تـا سـال ۲۰۱۵ ادامـه پیـدا کنـد بـه قسـمی کـه نتایـج ULCOS II قابلیـت تجـاری سـازی طی ۱۰ تـا ۱۵ سـال آینـده را داشـته باشـند (جـدول ۱ و شـکل ۳). قطعـاً توسـعه و بکارگیـری دسـتاوردهای تکنولـوژی ULCOS در صنایـع فـولاد، متضمـن قبـول مرتبـه‌ای از ریسـک اسـت. در ULCOS II بـه مـوازات اثبـات تجربـی فناوری‌هـا، بـه بررسـی برخـی از تحقیقـات فنـی صـورت گرفتـه در ULCOS I نیـز پرداختـه خواهـد شـد تا اجرایـی بـودن آنها در مقیـاس صنعتی

جدول ۱. خلاصه پروژه‌های جاری و آتی ULCOS

تکنولوژی ها	برنامه ها	مزایا	محدودیت‌ها	پیش بینی وضعیت
ULCOS–BF (بازیابی گاز خروجی کوره بلند) و CCS	FP6[1] ULCOS RFCS[2] ULCOS RFCS IDEOGAS RFC TGR–BF GREEN BF	۵۰٪ کاهش CO_2 در قیاس با میزان متوسط در کوره بلند انتظار می‌رود به استانداردی برای کارخانجات در شرف تأسیس تبدیل شود.	هزینه‌های بهره برداری بالاتر	۲۰۱۰: فاز پایلوت ۲۰۲۰: تجاری سازی
HIsarna (فولادسازی بدون کک) و CCS	FP6 ULCOS HIsarna RFCS	۸۰٪ کاهش CO_2 در قیاس با میزان متوسط در کوره بلند (در صورتی که از CCS استفاده نشود میزان کاهش به ۲۰٪ تقلیل می‌یابد). هزینه‌های سرمایه گذاری و بهره برداری کمتر به دلیل تنوع بیشتر مواد اولیه	نیاز به جایگزین کردن کوره بلندهای موجود	۲۰۲۰: فاز پایلوت ۲۰۳۰: تجاری سازی
ULCORED (فرایند احیای Fastmelt مستقیم) و CCS	FP6 ULCOS ULCORED RFSC	۵۵٪ کاهش CO_2 در قیاس با میزان متوسط در کوره بلند (در صورتی که از CCS استفاده نشود میزان کاهش به ۵٪ تقلیل می‌یابد). هزینه‌های بهره برداری کمتر به دلیل دلیل تنوع بیشتر مواد اولیه	نیاز ضروری به جایگزین کردن کوره بلندهای موجود هزینه سرمایه گذاری بالا	۲۰۱۵: فاز پایلوت ۲۰۲۰: تجاری سازی
الکترولیز (ULCOWIN و ULCOLYSIS)	FP6 ULCOS RFCS IERO ANR ASCOPE Auto thermal cell	احتمالا به هیچ کربنی در فرایند تولید نیاز نیست.		۲۰۳۰: فاز پایلوت
احیا با H_2	FP6 ULCOS			۲۰۱۰: توسعه نیافته است
استفاده از زیست توده های پایدار	FP6 ULCOS			توسعه نیافته است



شکل ۳. چشم انداز پروژه [۳۰]

1- EU's 6th Framework Program
2- Research Fund Coal Steel
3- European Steel Technology Platform

ارزیابی گردد [۳۰]. برای این منظور به سرمایه‌گذاری قابل توجهی برای تحقیق و توسعه از سوی کنسرسیوم ULCOS مشتمل بر اتحادیه اروپا و دیگر شرکای مالی، نیاز خواهد بود. سرمایه گذاری در برنامه‌های ULCOS I و ULCOS II بصورت خصوصی و سازمانی صورت گرفته است. ۶۰٪ هزینه‌های ULCOS I از طرف کنسرسیوم ULCOS و ۴۰٪ آن توسط کمیسیون اروپا در قالب 6TH Framework و برنامه‌های RFCS تأمین می‌گردد. در خصوص ULCOS II هنوز درصد مشارکت سازمانی و خصوصی در سرمایه گذاری مشخص نیست (جدول ۲) [۳۱].

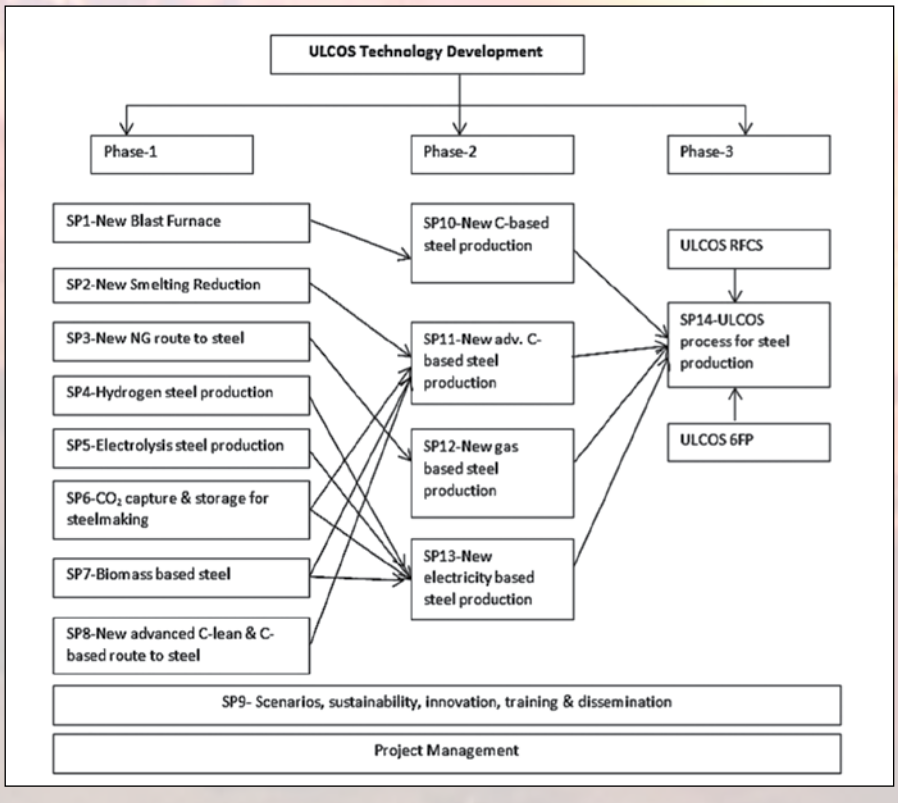
۴. وضعیت حال و آینده تحقیقات در برنامه ULCOS

در ابتدا تعدادی از آخرین دستاوردهای تکنولوژی در خصوص کاهش تولید CO_2 در صنایع آهن و فولاد تحت عنوان "برنامه فولادسازی با تولید ناچیز CO_2" (ULCOS) مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت ULCOS چهار فرایند مفهومی را، که قابلیت کاهش مؤثر CO_2 تا بیش از ۵۰٪ در مقایسه با بهترین روش‌های موجود داشتند، انتخاب نمود. این چهار تکنولوژی عبارتند از: (۱) بازیابی گازهای خروجی از کوره بلند به همراه گرفتن CO_2 و ذخیره آن (CCS)، (۲) HIsarna به همراه CCS، (۳) ULCORED به همراه CCS و (۴) الکترولیز. در عین حال فولادسازی بر پایه هیدروژن و استفاده از زیست توده‌ها بعنوان عامل احیا، راهکارهایی پشتیبان برای موارد فوق به حساب می‌آیند [۳۲ و ۳۳]. ساختار برنامه ULCOS در شکل ۴ توضیح داده شده است.

جدول۲. جزئیات پروژه ULCOS

	ULCOS I	ULCOS II
Start date	2004-09-01	2010
Project cost	35280915 euro	N/B
Contract type	Integrated project	N/B
End date	2010-08-31	2050
Project status	Completed	N/B
Project funding	19996966 euro	N/B

N/B: not available.



شکل ۴. ساختار پروژه ULCOS [۳۴]

استراتژی‌های کلیدی ULCOS، به شرح زیر در این برنامه گنجانده شده‌اند [۱۷]:

۴-۱- فرایند کوره بلند ULCOS (SP2 و SP1)

کوره بلند بیشترین مصرف کننده انرژی در بین دیگر فرایندهای صنعت آهن و فولاد است. لذا کاهش نشر CO_2 ناشی از سوخت‌های فسیلی در این فرایند ضروری است [۳۵]. در فرایند بازیافت گازهای کوره بلند (TGR-BF) که توسط ULCOSابداع شده، گازهای خروجی کوره بلند به منظور دستیابی به تولیدی پاک جداسازی می شوند. بخشی از این گازها دوباره به عنوان عامل احیا وارد کوره شده و بدین ترتیب مصرف کک و به تبع آن تولید CO_2 را کاهش می‌دهند. کاهش نشر CO_2 در این روش حدود ۵۰٪ است. استفاده همزمان از تکنولوژی TGR-BF و CCS در حذف نیتروژن از گاز خروجی مؤثر است. همچنین تزریق اکسیژن به کوره بلند می تواند بطور مؤثری به بازیابی CO_2 کمک کند. پس از استخراج CO_2 از گاز بازیافتی به کمک تکنولوژی VPSA CCS، از روش‌های برودتی برای ذخیره آن استفاده می‌شود [۳۶]. سه نسخه زیر مورد آزمایش قرار گرفتند [۳۷]:

• نسخه ۴، گاز جداسازی شده، توسط لوله های دمش اصلی و لوله‌های دمش اضافی تعبیه شده در بخش پایینی استک کوره به ترتیب در دماهای ۱۲۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتیگراد وارد کوره می‌شود. در این حالت میزان ذخیره کربن ۲۶٪ است.

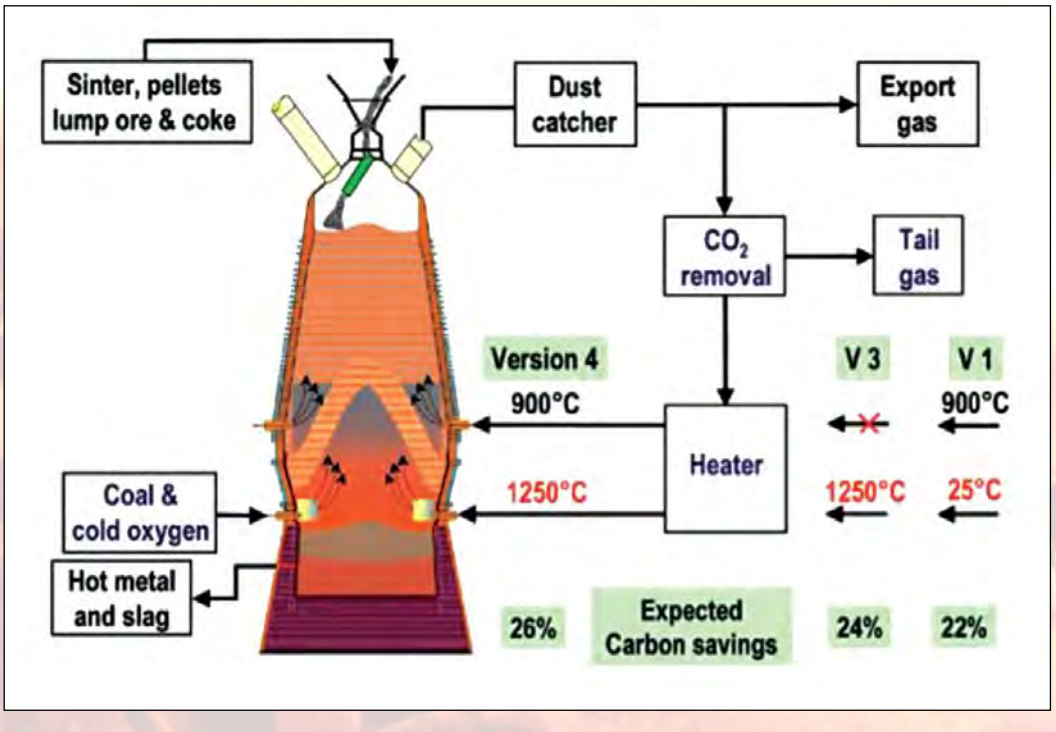
• نسخه ۳، گاز جداسازی شده صرفاً از طریق لوله‌های دمش اصلی وارد کوره می‌شود. در این حالت میزان ذخیره کربن ۲۴٪ است.

• نسخه۱، شرایط جریان گاز شبیه به نسخه ۴ است با این تفاوت که گاز به صورت سرد وارد کوره می-شود. در این حالت میزان ذخیره کربن ۲۲٪ است.

اولین آزمون در سال ۲۰۰۷ در کوره بلند آزمایشی کمپانی LKAB در شهر Lulea سوئد به‌شکل موفقیت آمیزی انجام شد. این آزمایش بطور مؤثر و با پایداری دمایی بالایی صورت گرفت و نتیجه آن کاهش ۲۴ درصدی نشر CO_2 بود. پس از آن در فاز دوم ULCOS، اتحادیه اروپا صدها میلیون یورو برای ارتقای این روش و طرح ریزی تکنولوژی TGR-BF سرمایه گذاری کرد. طرح موفق بود و امید است این تکنولوژی به میزان ۱/۵ میلیون تن در سال (یعنی حدود یک سوم برای یک کوره بلند) نشر CO_2 را کاهش دهد (شکل ۵) [۳۹].

۴-۱-۱- نتایج ULCOS EBF

فعالیت‌های گسترده‌ای در قالب تیم‌های تحقیقاتی به منظور مطالعه ULCOS BF [1] صورت گرفته است. این مطالعات در دو حوزه مطالعات نظری با استفاده از مدل‌های ریاضی (مانند مدل‌های موازنه جرم و حرارت، مدل لوله‌های دمش و کانال‌ها و مدل شرایط داخلی کوره بلند)، و بررسی‌های آزمایشگاهی (مانند بررسی شرایط احیا، خوردگی داغ، ذوب و نرم شدن سازه‌ها) انجام



شکل ۵. نمودار گردشی فرایندهای مختلف ULCOS BF [۳۷ و ۳۸]

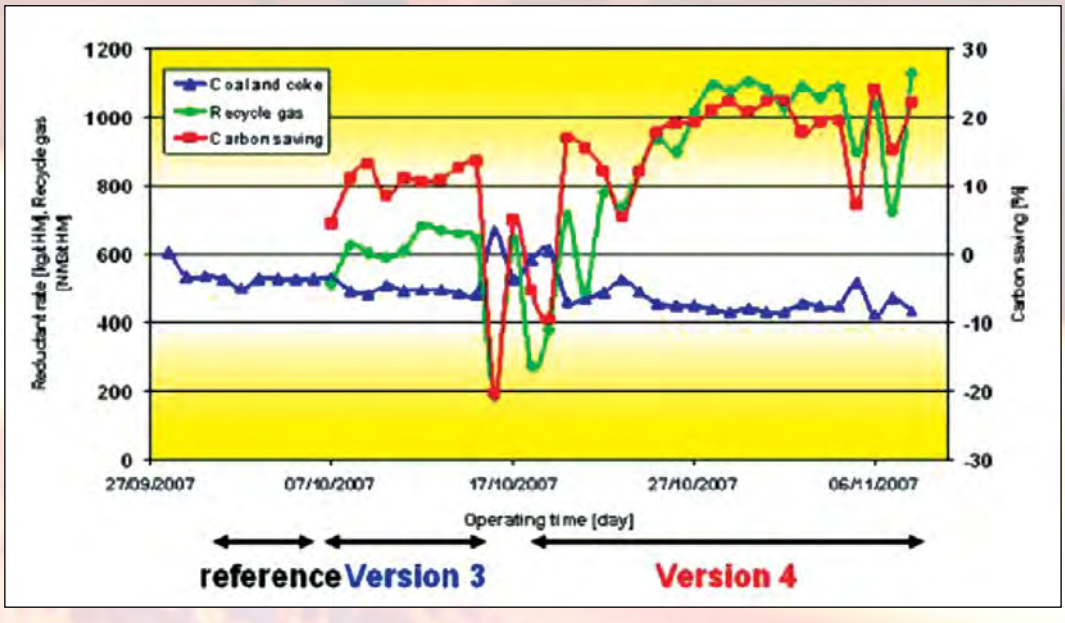
1- ULCOS Experimental Blast Furnace

شـده اسـت. نتایـج بررسـی‌های انجـام شـده بـر روی ULCOS EBF از نقطـه نظـر ذخیـره کربـن بسـیار نویـد بخـش هسـتند. در تمـام نسـخه‌های ULCOS EBF (نسـخه هـای ۱، ۳ و ۴) کـه در ارتبـاط بـا فراینـد VPSA[۲] هسـتند از تکنولـوژی CCS جدید شـرکت Air Liquide بـرای حـذف CO_2 اسـتفاده شـد و عملکرد آن در طـول عملیـات رضایـت بخـش بـود [۳۸].

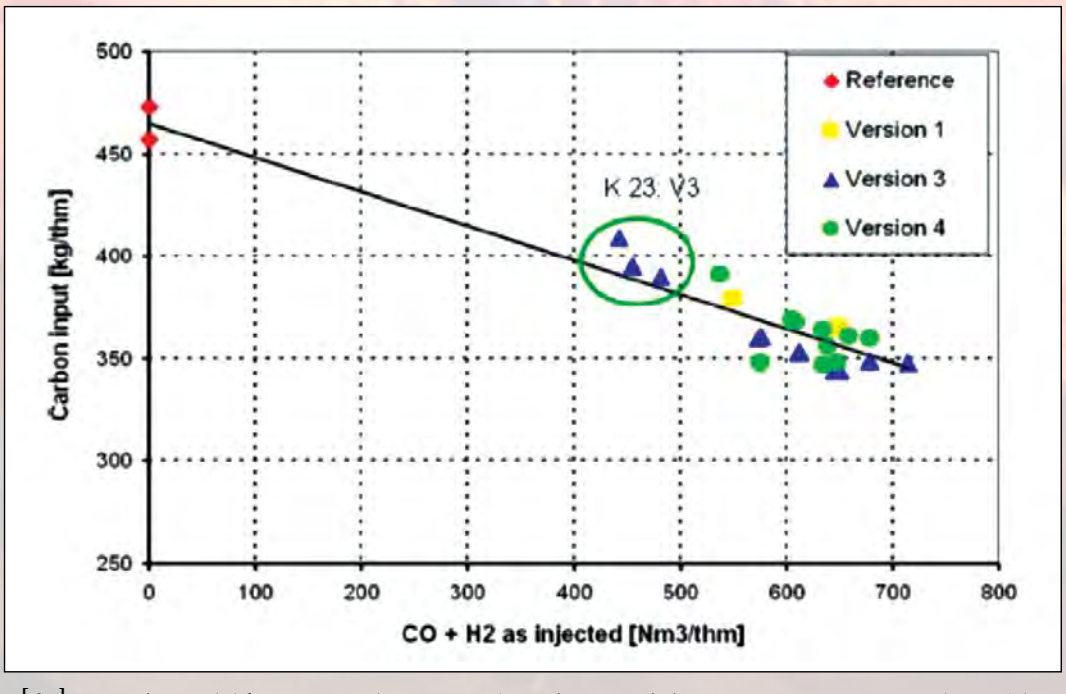
۴-۱-۱-۱- عملکرد کوره بلند

نکتـه مهمـی کـه بایـد بـه آن اشـاره کـرد کاهـش ورودی زغـال سـنگ و کک کـوره بلنـد از kg ۵۳۰ بـه kg ۴۰۰ در خـلال انجـام آزمایش‌هـا بـود کـه منجـر بـه کاهـش کربـن به میـزان قابـل توجـه kgC/thm ۱۲۰ شـد (شـکل ۶) [۴۳].

در نسـخه ۳، در صورتـی کـه نسـبت بازیافـت گاز کـوره بـه ۷۲٪ برسـد، مصـرف کربـن مـی توانـد تـا ۱۵٪ کاهـش پیـدا کنـد. ایـن میـزان کاهـش در نسـخه ۴ برابـر بـا ۲۴٪ با نسـبت بازیافـت ۹۰٪ خواهـد بـود. همچنیـن در فراینـد جدیـد تقریباً kg/thm ۱۲۳ از مصـرف زغـال سـنگ و کک در مقایسـه با دوره زمانـی فراینـد مرجـع، کاهـش یافـت. از ایـن نتایـج می‌تـوان دریافـت کـه رابطـه ای مناسـب بیـن تزریـق $CO_2 + H_2$ و نـرخ احیـا برقـرار اسـت و در ایـن میـان مـی تـوان مصـرف زغـال



شکل ۶. نتایج مربوط به میزان احیاکننده‌ها، گاز بازیافتی تزریق شده و صرفه‌جویی کربن [۴۳]



شکل ۷. نتایج ULCOS EBF در خصوص رابطه بین میزان صرفه‌جویی/ورود کربن و تزریق گاز کربن‌زدایی شده [۴۳]

1- Vacuum Pressure Swing Adsorption

سنگ و کک را به میزان ۱۷ kg به ازای تزریق ۱۰۰ Nm^3 گاز CO_2+H_2 کاهش داد (شکل ۷) [۳۷].

۴-۱-۱-۲- نتایج کارگاه VPSA

بهره برداری از فرایند VPSA بسیار راحت و بی دردسر است. در این فرایند ۹۷٪ گاز خروجی کوره بلند فراوری می‌شود و مقدار متوسط CO_2 در گاز تزریق شده ٪ ۲/۶۷ است در حالی که مقدار مجاز ۳٪ می‌باشد. میزان بازیافت CO برابر با ۸۸٪ است. این فرایند قادر است همواره گاز مورد نیاز را به مقدار و کیفیت لازم فراهم کند [۳۸].

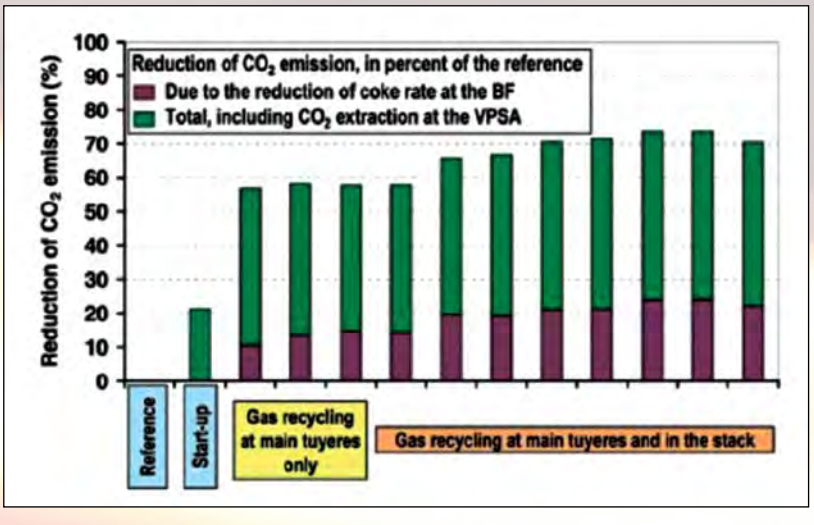
۴-۱-۱-۳- کاهش نشر CO_2

بازیافت گاز خروجی کوره بلند همراه با بکارگیری تکنولوژی VPSA CCS می‌تواند نشر گاز CO_2 را تا ۱۲۷۰ kg/thm کاهش دهد که معادل ۷۶٪ گاز CO_2 تولید شده در بازه زمانی فرایند مرجع است. ۲۴٪ از کاهش نشر CO_2 متعلق به فرایند بازیافت گاز و ۵۲٪ دیگر بابت استفاده از تکنولوژی VPSA با احتساب ذخیره زیرزمینی CO_2 استخراج شده است (شکل ۸) [۳۸].

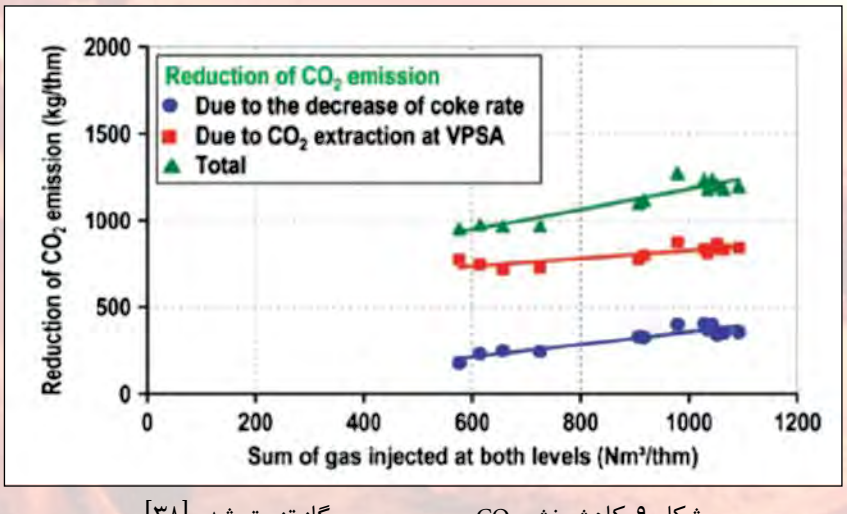
شکل شماره ۹ ارتباط بین کاهش نشر CO_2 و حجم تزریق گاز فراوری شده به کوره بلند را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از فعالیت‌های صورت گرفته در ULCOS EBF به خوبی نشان می‌دهد که در یک مجتمع فولادسازی می‌توان با بکارگیری فرایند بازیافت گاز خروجی همراه با تکنولوژی CCS، مصرف سوخت‌های فسیلی در کوره بلند را به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

۴-۲- احیا کننده ذوبی HIsarna

مبنای فرایند HIsarna نسخه بهینه سازی شده تکنولوژی احیای ذوبی HIsmelt است. این فرایند تلفیقی است از سه تکنولوژی جدید در عرصه آهن‌سازی که عبارتند از: (۱) پیش گرمایش و تجزیه حرارتی جزئی زغال سنگ در



شکل۸. کاهش نشر CO_2 در دوره های بهره برداری مختلف [۳۸]



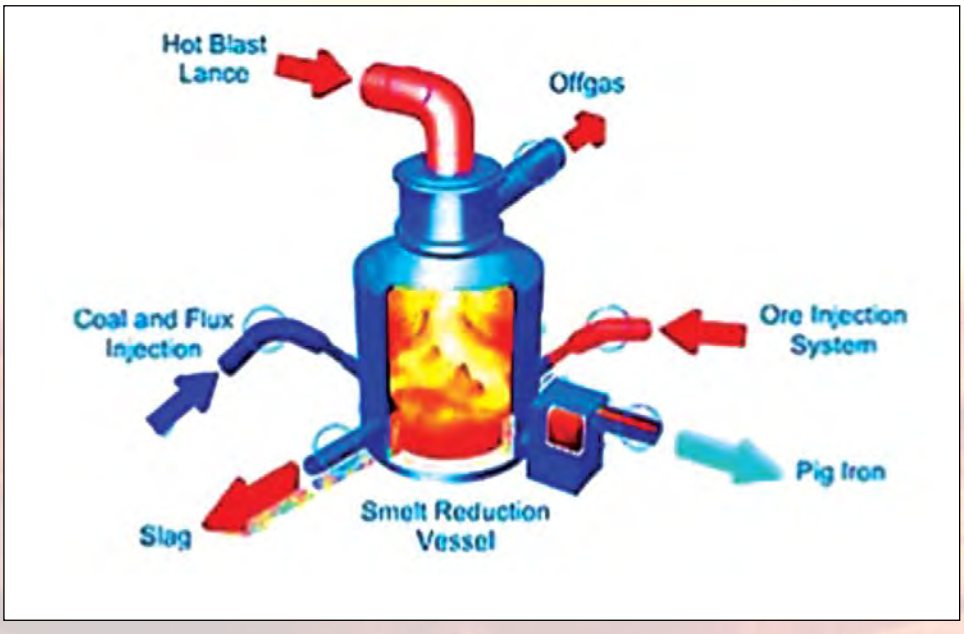
شکل ۹. کاهش نشر CO_2 بر حسب حجم گاز تزریق شده [۳۸]

راکتور، (۲) پیش احیای سیکلونی[1] سنگ معدن و (۳) ذوب برای احیای نهایی سنگ معدن و تولید آهن [۴۴].
در تکنولوژی احیای ذوبی HIsarna عملیات پیش گرم زغال سنگ و تجزیه حرارتی جزئی آن در یک رآکتور انجام می‌شود. همچنین از یک کوره سیکلونی برای احیای ذوبی سنگ معدن و از یک ذوب کننده برای احیای نهایی سنگ معدن استفاده می‌شود. در واقع با حذف فرایندهای کک سازی و سینتر در این روش مقدار CO_2 تولید شده کاهش می‌یابد. علاوه بر این در صورت استفاده از زیست توده یا گاز طبیعی به جای زغال سنگ، فراوری گازهای حاصل از احتراق، جمع آوری و ذخیره CO_2 و بازیابی انرژی حرارتی، تکنولوژی HIsarna قادر به کاهش نشر CO_2 تا ۷۰٪ خواهد بود [۴۵]. مزایای این روش عبارتند از:

- کاهش ۲۰ درصدی نشر گاز CO_2
- کاهش ۸۰ درصدی نشر گاز CO_2 در صورت اضافه شدن فرایند CCS
- حذف کک و حذف آلاینده‌های واحد های سینترینگ و گندله سازی
- امکان استفاده از زغال سنگ‌های غیر کک شونده
- امکان استفاده از سنگ معدن ارزان با کیفیت پایین تر از استاندارد کوره بلند
- جذاب به لحاظ اقتصادی حتی در واحدهای کوچک (۰/۸ - ۱/۵ M thm/y)

در سپتامبر سال ۲۰۱۰ طرح پایلوت این تکنولوژی توسط شرکت TATA Iron در IJmuiden Holland احداث گردید که ظرفیت آن ۶۵ kt در سال معادل تولید ۸ t/h آهن داغ است. در این طرح ظرفیت ورودی زغال سنگ و سنگ معدن به ترتیب ۱۵ t/h و ۸ t/h است. در صورت موفقیت آمیز بودن طرح، این تکنولوژی طی ۱۰ تا ۲۰ سال آینده در سطح تجاری مورد بهره برداری قرار می‌گیرد (شکل ۱۰) [۴۶].
وضعیت پیشرفت پروژه به شرح ذیل است [۴۰]:

- احداث طرح آزمایشی در آیمودن هلند توسط TATA Steel در سال ۲۰۱۰ بدون استفاده از CCS
- ادامه طرح آزمایشی تا ۲۰۱۲
- ورود به فاز صنعتی طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸
- تجاری سازی تکنولوژی از ۲۰۲۰ به بعد



شکل ۱۰. طرحواره‌ای از تکنولوژی احیای ذوبی HIsarna

1- Melting cyclone

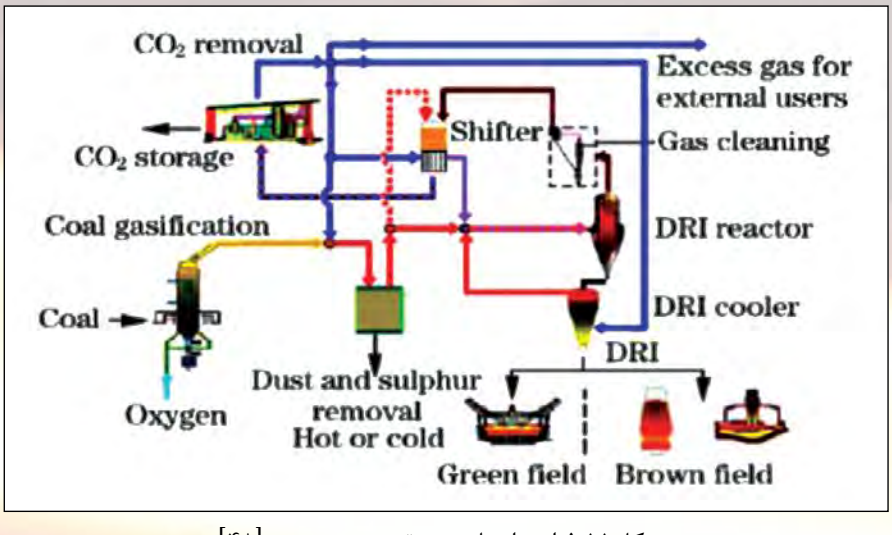
۴-۳- احیای مستقیم آهن با گاز طبیعی (SP3)(ULCORED)

اساساً روش احیای مستقیم با گاز طبیعی علیرغم مشکلاتی همچون هزینه های بالاتر نسبت به روش کوره بلند یا نیاز به مواد اولیه با کیفیت خاص، به دلیل حذف کوره های کک سازی کمک قابل توجهی به کاهش مصرف کربن و به تبع آن کاهش نشر CO_2 می کند. هدف پروژه ULCORED کاهش مصرف گاز طبیعی مورد نیاز برای احیای مستقیم سنگ آهن است. برای این منظور استفاده از راکتورهای گازساز (شکل ۱۱) یا استفاده از روش اکسیداسیون جزئی گاز طبیعی به جای روش سنتی شکست گاز در ریفرمرها مورد بررسی قرار گرفته است. قابل ذکر است بازیافت گاز خروجی از مدول احیا و پیش گرم آن نیز نقش بسزایی در کاهش مصرف گاز طبیعی دارد. با این روش می توان نشر CO_2 را تا ۶۰٪ کاهش داده و در عین حال احیای مستقیم را به فرایندی اقتصادی‌تر تبدیل نمود.

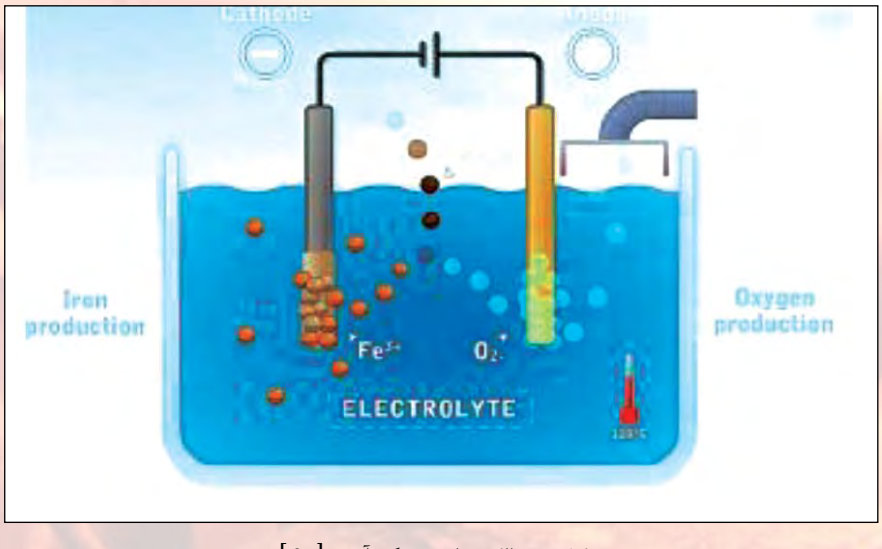
۴-۴- الکترولیز مستقیم سنگ آهن (ULCOwin و ULCOlysis)

محصول فرایند الکترولیز مستقیم سنگ آهن که اساس آن ابتدا در پروژه ULCOWIN بکار گرفته شد، آهن و اکسیژن است و در این فرایند خبری از نشر CO_2 نیست. دمای واکنش الکتروشیمیایی ۱۱۰ درجه سانتیگراد است. سنگ آهن و آهن به ترتیب به عنوان آند و کاتد انتخاب می‌شوند (شکل ۱۲).

در ULCOLYSIS سنگ معدن در مخلوطی از اکسیدهای مذاب در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد حل می‌شود [۵۰]. آند که از جنس ماده‌ای خنثی در برابر اکسیدهای مذاب ساخته شده است وارد محلول می‌شود. جریان الکتریکی بین آند و حوضچه آهن مایع (کاتد) برقرار می‌شود. در طی فرایند، آهن بصورت مایع در کاتد تولید شده و گاز اکسیژن از سمت آند آزاد می‌شود.



شکل ۱۱. فرایند احیای مستقیم ULCORED [۴۸]



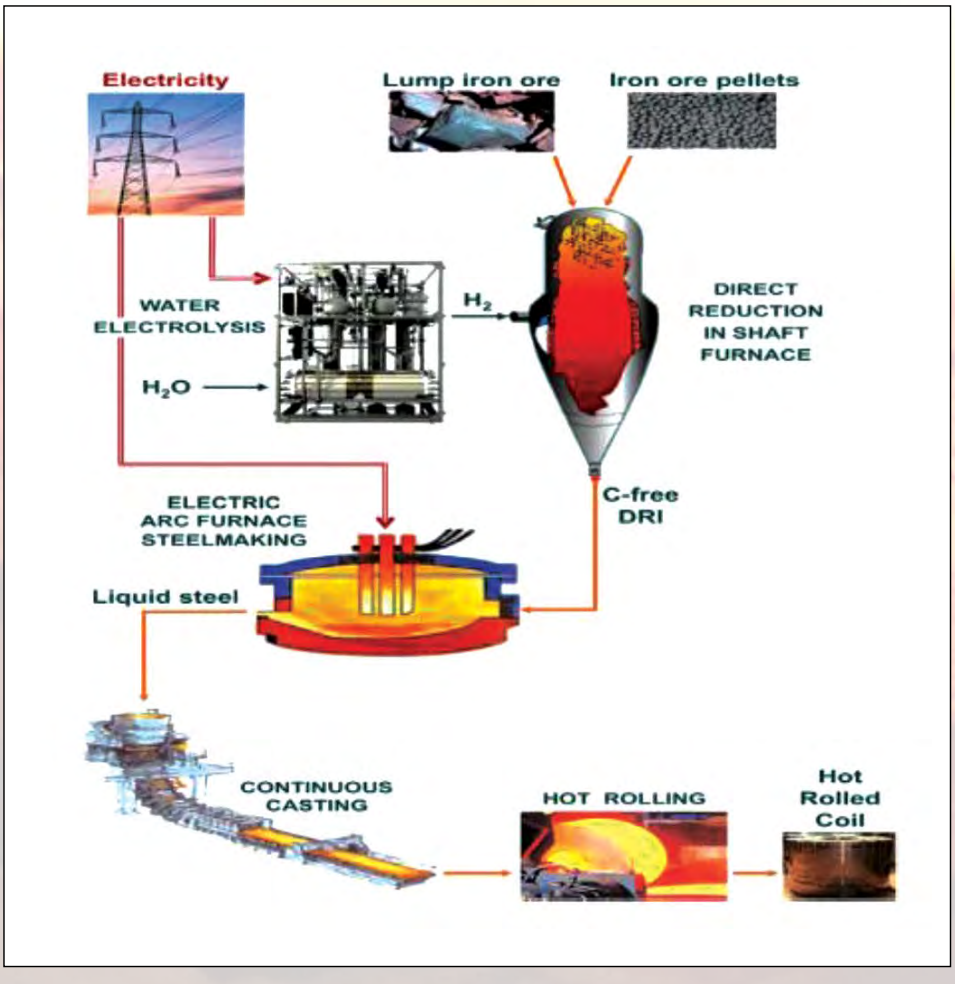
شکل ۱۲. الکترولیز سنگ آهن [۴۹]

۴-۵- آهن سازی پایه هیدروژنی

در روش تولید پایه هیدروژنی فولاد، نشر CO_2 تا ۸۰٪ کاهش می یابد. چالش اصلی در این روش دسترسی ارزان به منابع هیدروژن پاک[1] است. هیدروژن را می توان از گاز طبیعی (با کمک ریفرمرهای بخار) و یا الکترولیز آب بدست آورد. این روش تولید فولاد به دلیل مصرف کم کربن و صرفه اقتصادی، می تواند برای کشورهایی که دسترسی ارزان به گاز طبیعی دارند جذاب باشد [۳۴و۵۱]. مطالعاتی که تا به حال انجام شده روی موضوعاتی همچون بکارگیری هیدروژن در کوره های صنعتی، تولید هیدروژن از گاز خروجی کوره بلند یا کوره کک سازی و تولید هیدروژن هسته‌ای، متمرکز بوده اند [۵۲]. در سال ۲۰۰۳ محققی به نام Ranzani و همکارانش [۵۷] یک مدل ریاضی برای فولادسازی با هیدروژن خالص ارائه دادند که در آن از هیدروژن بعنوان عامل احیا در فرایند احیای مستقیم استفاده شده بود. در روشی که برنامه ULCOS در این زمینه تحت بررسی دارد تولید هیدروژن با روش الکترولیز آب صورت می پذیرد و برق مورد نیاز آن از طریق نیروگاه‌های هسته ای یا آبی تأمین می گردد. در این روش از یک کوره شفت برای احیای مستقیم سنگ آهن استفاده شده و محصول آن (DRI) توسط کوره قوس الکتریکی به فولاد تبدیل می‌شود (شکل ۱۳) [۵۷].

این روش تولید، دستاوردی نوید بخش در راستای هدف اصلی برنامه ULCOS به شمار می‌آید. با این روش میزان تولید گاز CO_2 تا ۳۰۰ kg به ازای تولید یک تن فولاد کاهش می‌یابد که در مقایسه با شرایط فعلی کوره بلند (۱۸۵۰ kg گاز CO_2 به ازای هر تن فولاد)، ۸۴٪ کاهش دارد [۵۸].

همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد آینده این روش تولید اصطلاحاً به اقتصاد هیدروژن گره خورده است. بدین مفهوم که گاز هیدروژن باید به مقدار کافی و قیمتی رقابتی موجود باشد و در عین حال فرایند تولید آن CO_2 بسیار کمی تولید کند. باید به این نکته نیز توجه داشت که هیدروژن در آینده مصرف کنندگان دیگری در بخش‌های مختلف صنعت خواهد داشت و ممکن است این بخش‌ها حاضر باشند هیدروژن را با قیمت بیشتری بخرند. مثال بارز در این خصوص صنعت حمل و نقل است.



شکل ۱۳. روش تولید فولاد پایه هیدروژنی [۵۷]

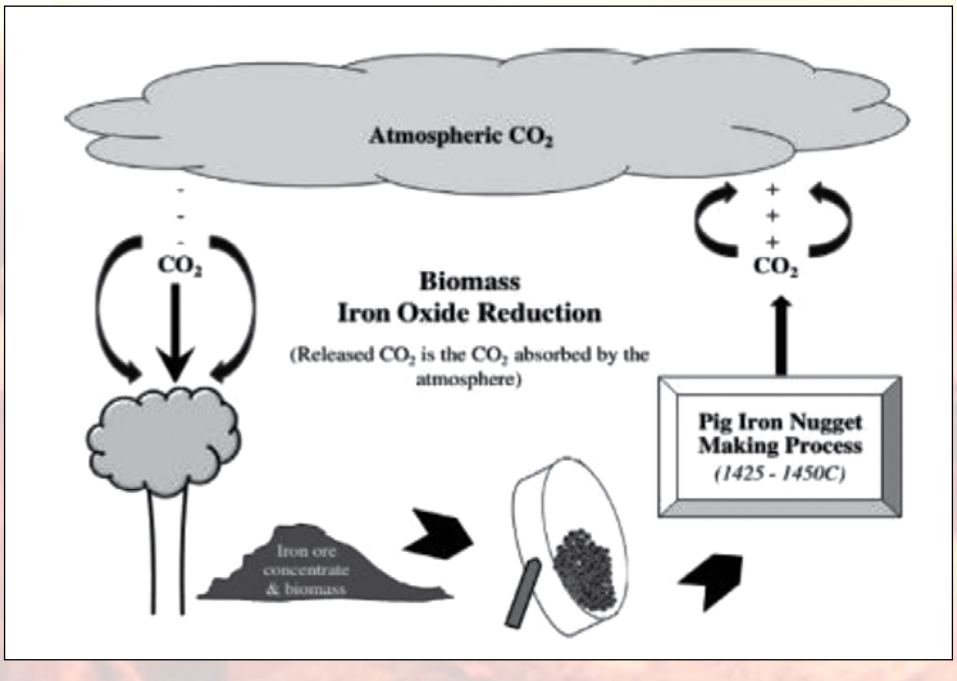
1- Green Hydrogen

۴-۶- تولید فولاد بر پایه زیست توده‌ها

استفاده از زیست توده‌ها بعنوان عامل احیا در کوره بلند می‌تواند منجر به کاهش نشر CO_2 ناشی از مواد فسیلی در عملیات تولید فولاد گردد. زیست توده‌ها عمدتاً از کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد تشکیل شده‌اند. مقدار کربن موجود در زیست توده‌ای مانند چوب به مراتب کمتر از زغال سنگ، کک و یا نفت است [۵۹]. از طرف دیگر میزان گوگرد آن هم ناچیز است (حدود wt٪ ۰/۱-۰/۰۱ ماده خشک) که برای استفاده در کوره بلند مزیت محسوب می‌شود [۶۰]. چالش‌های کلیدی در استفاده از زیست توده‌ها عبارتند از: (۱) آیا کشت زیست توده‌ها منجر به تخریب محیط زیست از نوع تخریب جنگل‌ها، آلودگی آب و هوا و یا کاهش تنوع زیستی می شود؟ (۲) آیا استفاده از زیست توده‌ها می تواند منجر به صدمات اقتصادی یا اجتماعی مانند افزایش قیمت غذا یا جابجایی مردم از سرزمینشان شود؟ [۶۱] راه حل بسیار محتمل برای تولید زیست توده‌ها در آینده تهیه زغال از طریق کاشت درخت اوکالیپتوس در کشورهای استوایی مانند برزیل یا آنگولاست. در برزیل تجربه زیادی در خصوص کاشت و تبدیل این درخت وجود دارد. در حال حاضر در برزیل کوره بلندی وجود دارد که بطور ۱۰۰٪ از زغال چوب استفاده می کند. انتقال این تکنولوژی به اروپا یکی از چالش‌های برنامه ULCOS است. یکی از مشکلاتی که اضافه کردن زغال چوب به کک در کوره بلند ایجاد می‌کند این است که دیگر استحکام دمای بالای قبلی کک حاصل نخواهد شد [۶۱]. در سال ۲۰۱۳ محققی بنام Srlvastava و همکارانش [۶۲] پیدایش این تکنولوژی را با ساخت گندله ای خود احیا شونده مرکب از اکسید آهن و زیست توده، رقم زدند. عوامل احیا در این تکنولوژی یا همان زیست توده‌ها، نه تنها سازگار با محیط زیست و تجدید پذیر هستند بلکه در حین رشد CO_2 اتمسفر را مصرف کرده و آن را به کربوهیدراتی تبدیل می کنند که عامل احیای آهن است؛ درست بر خلاف زغال سنگ که استخراج آن از زمین متضمن افزایش CO_2 در اتمسفر است (شکل ۱۴) [۶۲]. علیرغم اینکه هزینه‌های کاهش نشر CO_2 با استفاده از زیست توده‌ها بشکل قابل توجهی بالاست با اینحال این تکنولوژی جایگزین انعطاف پذیری در این حوزه محسوب می شود.

۴-۷- پروژه ULCOS CCS

جداسازی و ذخیره کربن یکی از روش‌های کارآمد در کاهش نشر CO_2 در مقادیر زیاد است. این تکنولوژی برای صنایع آهن و فولاد بسیار مناسب است زیرا در این صنایع CO_2 از نقاطی ثابت و قابل دسترس منتشر می‌شود. برای این منظور کافی است CO_2 از گاز خروجی جدا شده سپس با استفاده از فشرده سازی و یا روش‌های تبریدی به مایع تبدیل شده و از طریق شبکه لوله به زیر زمین منتقل گردد [۶۳]. برنامه ULCOS در خلال پروژه‌های آزمایشی خود تکنیک‌های مختلفی از CCS را بکار گرفته است. یکی از این تکنیک‌های جدید که در پروژه TGR-BF شهر Lulea مورد استفاده قرار گرفت، VPSA نام دارد و توسط کمپانی Air Liquide توسعه یافته است. دو تکنیک دیگر به نام‌های PSA و VSA در این خصوص وجود دارند و در شکل ۱۵ دامنه کاربرد و عملکرد آنها



شکل ۱۴. استفاده از زیست توده بعنوان عامل احیا در آهن‌سازی [۶۲]

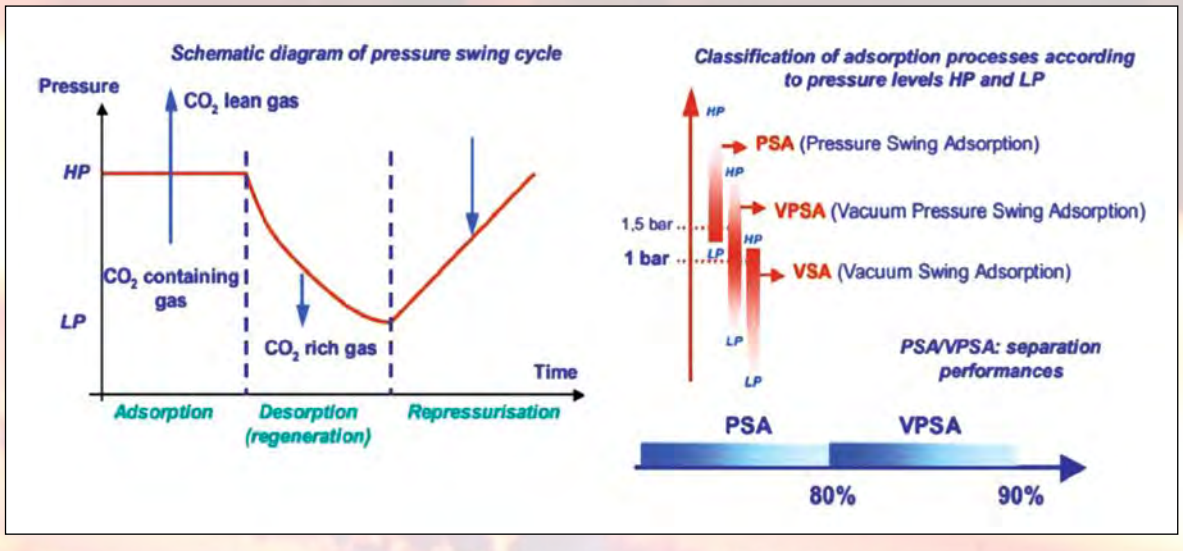
مقایسه شده است. آزمایش‌های TGR-BF برنامه ULCOS بیانگر این موضوع است که تکنیک‌های مختلف جذب در CCS مانند جذب شیمیایی، جذب فیزیکی، PSA، VPSA و یا روش‌های تبریدی هرکدام زمینه‌های بهینه سازی مختلفی دارند.

استفاده از CCS در تکنولوژی ULCORED بهره‌وری را افزایش می دهد. در خصوص تکنولوژی HIsarna استفاده از یک واحد تبریدی به تنهایی منجر به جداسازی گاز CO_2 با سطح غلظت بالا می‌شود. ترکیب گازهای ورودی در TGR-EBF در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

در جدول شماره ۴ مقایسه‌ای بین تکنولوژی‌های مختلف جذب CO_2 که امروزه برای صنایع آهن و فولاد در دسترس هستند ارائه شده است. در برنامه ULCOS دو روش برای ذخیره CO_2 جداسازی شده وجود دارد. یکی استفاده از انبارهای طبیعی زمین مانند ذخیره سازی در اعماق کف دریا است. روش دوم مینرالیزه کردن دی‌اکسید کربن یا به عبارتی تبدیل آن به سنگ معدنی است که بطور جدی توسط ULCOS در حال بررسی است [۶۸و۶۹].

۵.عملکرد اقتصادی و محیط زیستی تکنولوژی های ULCOS

در جدول شماره ۵ اعداد و ارقام مربوط به عملکرد اقتصادی و محیط زیستی دستاوردهای تکنولوژی در برنامه ULCOS در مقایسه با عملکرد متوسط کوره بلندها در اروپا



شکل ۱۵. دامنه کاربرد و عملکرد تکنیک‌های PSA، VPSA و VSA

جدول ۴. مقایسه بین تکنولوژی های جذب CO_2 در صنعت فولاد

	Units	PSA	VPSA	VPSA+ compression and cryogenic flash	Amines+compression	PSA+cryogenic distillation compression	Ref.
Recycled gas (process gas)							[64,65]
CO yield	%	88,0	904	973	999	100	
CO	% vol	71,4	682	689	678	695	
CO_2	% vol	27	30	30	29	27	
N_2	% vol	135	157	156	151	154	
H_2	% vol	124	130	126	121	124	
H_2O	% vol	0	0	0	21	0	
CO_2 rich gas captured							[66]
CO	%vol (dry)	121	107	33	0	0	
CO_2	%vol (dry)	797	872	963	100	100	
N_2	%vol (dry)	56	16	3	0	0	
H_2	%vol (dry)	25	6	1	0	0	
Suitable for transport and storage?		No	No	Yes	Yes	Yes	
Energy requirements for CCS process							[67]
Capture process	KWh/tCO_2	100	105	160	55	195	
Compression for storage (110 bar)	KWh/tCO_2	–	–	132	115	115	
Electricity consumption(CP+CS)	KWh/tCO_2	**100**	**105**	**292**	**170**	**310**	
LP steam consumption	GJ/t CO_2	0	0	0	32	0	
Total energy consumption	**GJ/t CO_2**	**0.36**	**0.38**	**1.05**	**3.81**	**1.12**	

نمایش داده شده است.

در مقایسه با معیار پیشنهاد شده از طرف EU ETS برای نشر CO_2 (معادل ۱۴۶۰ kg CO_2/ t HM)، ملاحظه می‌شود که همه تکنولوژی‌ها آمار بهتری در این خصوص ارائه می‌دهند. فرایند HIsarna در این بین هم به لحاظ زیست محیطی و هم به لحاظ اقتصادی بهترین نتیجه را در مصاف با فرایند معمول کوره بلند و TGR -BF دارد. این فرایند به شکل قابل توجهی راندمان انرژی بالاتری نسبت به فرایندهایی مانند سینتر یا گندله سازی داشته و با دیگر دستاوردهای مبتکرانه قابل مقایسه است. در صورت اضافه کردن فرایند CCS به آن، نشر CO_2 تا ۸۰٪ کاهش می‌یابد [۷۰]. در بازه زمانی طولانی مدت امکان در دسترس بودن تکنولوژی ULCORED وجود دارد؛ به شرطی که کلیه انرژی الکتریکی مورد نیاز آن از منابع تجدیدپذیر تولید گردد که در این صورت قابلیت کاهش ۸۰ تا ۹۵ درصدی CO_2 وجود خواهد داشت. در حال حاضر این تکنولوژی توسعه نیافته و بسیاری از جنبه‌های فنی و عملکردی آن قابل ارزیابی نیست [۷۳].

جدول شماره ۶ بروز رسانی‌های برنامه ULCOS را نشان می دهد. چالش‌هایی که برنامه ULCOS همواره با آن روبرو بوده دستیابی به تکنیک‌های موثر با راندمان بالا برای کاربردهای واقعی و عملی، توجیه اقتصادی و از همه مهم‌تر چگونگی انتقال تکنولوژی‌های جدید به فرایندهای سنتی مانند کوره بلند است.

۶. مقایسه ULCOS و دیگر دستاوردهای جهانی در خصوص کاهش نشر CO_2

فعالیت‌های گسترده‌ای در سراسر دنیا به منظور دستیابی به روش‌های پاک برای تولید آهن و فولاد صورت گرفته و یا در حال انجام است. تبادل اطلاعات و دانش فنی در این خصوص در انجمن بین المللی آهن و فولاد صورت می‌گیرد. سرمایه گذاری‌ها و فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در این خصوص در کشورهای زیر صورت گرفته است [۷۴].

جدول ۵. عملکرد اقتصادی و محیط زیستی تکنولوژی‌های ULCOS [۷۰ تا ۷۲]

	Current EU average BF	TGR-BF configuration	HIsarna	ULCORED
Production capacity (Mt HM/yr.)	0.5–5.0	0.5–5.0	0.5–1.0	0.5–1.0
Environmental aspects	100%		80%	95–85%
Energy consumption	(± 17 GJ/ tonne HM)			
CO_2 emission (tonne/ tonne HM*)				
-with CCS:	1650	790 (−52%)	330 (−80%)	760 (?) (−54%)
-without CCS:	1650	Not relevant	1320 (−20%)	1590–1420 (−5%)
Economic aspects				
CAPEX				
-Greenfield	100%	105%	75%	200%-no CCS
-Brownfield	–	25%	65%	
OPEX (Incl. energy, excl. depreciation costs)	100%	120%	90%	80–90% -no CCS

Notes: The proportions should be interpreted as relative scores, as the performance of the reference average blast furnace is set at 100%. The other data are absolute figures.

* HM=hot metal (or pig-iron).

جدول ۶. بروزرسانی‌های برنامه ULCOS [۴۸]

ULCOS	TGR-BF	HIsarna	ULCORED	ULCOWIN
Characteristics	Revamped BF	Green field	Revamped DRI or green field Natural gas	Green field
Fuel	Coal and sustainable biomass	Coal and sustainable biomass	Natural gas	Electricity
Phase	1.5 t/h pilot tests demonstration under way	8 t/h pilot plant startup 2010	1 t/h pilot plant to be erected in 2013	Laboratory

- اتحادیه اروپا (ULCOS I و ULCOS II)
- ایالات متحده آمریکا (مؤسسه آهن و فولاد آمریکا)
- کانادا (انجمن تولیدکنندگان فولاد کانادا)
- استرالیا (مشارکت شرکت‌های BlueScope Steel و One Steel (CSIRO)
- آمریکای جنوبی (ArcelorMittal برزیل)
- ژاپن (فدراسیون آهن و فولاد ژاپن)
- کره (POSCO)
- چین (Bao Steel)
- تایوان (China Steel)

COURSE ۵۰ یک برنامه ملی برای کاهش نشر CO_2 است که توسط فدراسیون آهن و فولاد ژاپن اداره می‌شود [۶۶]. هدف این برنامه کاهش ۳۰ درصدی نشر CO_2 از طریق کاهش CO_2 خروجی از کوره بلند و همچنین جمع‌آوری CO_2 خروجی است. برای این منظور از تکنولوژی جدید Amine Scrubbing استفاده می‌شود. این برنامه تا سال ۲۰۵۰ به یک تکنولوژی توسعه یافته تبدیل می‌شود [۷۵و۷۶]. همچنین شرکت POSCO در حال تدوین و توسعه تکنولوژی CCS Ammonia–Based Scrubbing است و قصد دارد آن را با فرایندهای COREX و FINEX سازگار نماید [۷۷].

مؤسسه آهن و فولاد آمریکا (AISI) با سازماندهی برخی دانشگاه‌های رده بالای این کشور، برنامه کاهش مصرف کربن در صنعت فولاد را آغاز کرده است. این برنامه شامل استفاده از انواع مختلف انرژی‌های پاک و توسعه تکنولوژی‌های جمع آوری و جداسازی CO_2 است. بعنوان مثال الکترولیز دما بالای سنگ آهن در MIT، احیای هیدروژنی سنگ آهن در دانشگاه یوتا، جداسازی با مینرالیزه کردن در دانشگاه کلمبیا و جمع آوری CO_2 از گاز خروجی کوره قوس الکتریکی با کمک آهک در دانشگاه میسوری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۷۸و۷۹]. به نقل از برنامه AISI، دو تکنولوژی مبتکرانه برای کاهش نشر CO_2 در صنعت فولاد وجود دارد [۸۰]:

(1) Molten Oxide Electrolysis (MOE)

و

(2) Hydrogen Flash Smelting.

در برزیل و کانادا بصورت جداگانه روی تولید فولاد با زیست توده‌ها کار می‌شود [۸۱]. در استرالیا و تایوان هم برنامه‌هایی برای کاهش نشر CO_2 در جریان است که بیشتر در سطح مفهومی بوده و بصورت فعالیت‌های پژوهشی در دانشگاه‌ها انجام می‌شود. در میان تمام این فعالیت‌ها، تنها برنامه زمانبندی COURSE ۵۰ و ULCOS منتشر شده است. فعالیت‌های صورت گرفته در چین بطور شفاف تشریح نشده است. همچنین علیرغم ابراز تمایل کشور هند برای ورود به این برنامه، کماکان اقدام عملی در این خصوص گزارش نشده است (جدول ۷) [۱۳].

تمام این برنامه‌ها شبیه به برنامه ULCOS هستند با این تفاوت که به اندازه ULCOS در خصوص توسعه تکنولوژی‌های نو پیشرفت نداشته‌اند و اساساً میزان پیشرفت آنها به خوبی گزارش نمی‌شود. در جدول شماره ۸ مقایسه‌ای کلی بین برنامه‌های مهم کاهش CO_2 در دنیا ارائه شده است.

جدول ۷. مقایسه بین پروژه‌های تولید فولاد در سال ۲۰۵۰

Source of estimates	Annual production (Mt/yr)	Comments
ULCOS-LEPII	2450/2550	POLES estimates
RITE	2200	Markal model
Tokyo university	1800	MFA model
IEA Blue Maps (low/high)	2350/2700	

۷. تحقیقات آینده

نتایج حاصل از تحلیل و امکان سنجی انواع مختلف تکنولوژی‌های پیشرفته حاکی از آن است که بکارگیری تکنولوژی CCS در مجتمع‌های فولاد با پایه زغال سنگ راه حلی مؤثر در خصوص کاهش نشر CO_2 و تولید فولاد پاک محسوب می شود. بنابراین تحقیقات آینده معطوف به مطالعه عملکرد زیست محیطی فرایند CCS و بررسی پتانسیل آن برای بکارگیری در دیگر واحدهای فولادسازی است.

تحقیقات بیشتر باید روی ارزیابی آخرین دستاوردهای تکنولوژی در حوزه تولید فولاد متمرکز شوند. تحلیل اثرات زیست محیطی و ارزیابی چرخه حیات در اولویت اول قرار دارد و پس از آن می‌توان به مباحث توجیه فنی-اقتصادی پرداخت.

به نظر می رسد هیچکدام از دستاوردهای جدید به تنهایی پاسخگوی رفع معضلات نیست. لذا تحقیق و بررسی در خصوص تجمیع و تلفیق این تکنولوژی‌ها برای حصول بهترین نتیجه باید در دستور کار قرار گیرد.

نکته مهم دیگر بررسی و مطالعه موانع و مشکلاتی است که در مسیر جایگزین شدن تکنولوژی‌های نو با روش‌های سنتی در صنعت فولاد وجود دارد.

۸. نتایج

این مقاله وضعیت حال حاضر، گرایش‌های آینده و اهمیت بکارگیری دستاوردهای تکنولوژی کنترل CO_2 در صنعت آهن و فولاد برای کاهش گازهای گلخانه‌ای را بیان می‌کند. کاهش نشر CO_2 و ذرات معلق از جنبه‌های مهم صنعت آهن و فولاد محسوب می‌شود. در این راستا و زیر نظر برنامه‌های جهانی کاهش CO_2، راه حل‌های جدید همواره در حال بررسی و ارزیابی هستند. ULCOS هم بعنوان بخشی از این برنامه‌ها مطابق با طرح مدونی در حال فعالیت بوده است.

برنامه در حال حاضر در فاز دوم خود قرار دارد و در طول مدت فعالیت خود حجم انبوهی از دانش علمی و نتایج فنی تولید کرده است. هر کدام از تکنولوژی‌های توسعه یافته در این برنامه شامل HIsarna، TGR-BF و ULCORED

جدول ۸. مقایسه کلی بین برنامه‌های کاهش نشر CO_2 [۴۸و۶۵و۶۷]

برنامه ها	نهادهای ذیربط	اهداف	بهترین نتایج
AISI- Technology Roadmap program ۱ (US)	AISI دفتر تکنولوژی‌های صنعتی وزارت انرژی آمریکا	- افزایش راندمان مصرف انرژی - افزایش رقابت‌پذیری صنعت فولاد آمریکای شمالی	- احیای معلق کنسانتره اکسید آهن با هیدروژن - الکترولیز اکسید مذاب
POSCO CO_2 Breakthrough Framework (Korea)	POSCO، RIST، POSLAB و POSTECH	- بهبود شرایط زیست محیطی در چارچوب ۶ پروژه: ۱- احیای اولیه و بازیافت حرارتی در سنتز داغ ۲- جذب CO_2 با محلول آمونیاک ۳- استفاده از bioslag برای بازسازی محیط دریایی ۴- تولید هیدروژن از COG و پسماندها ۵- احیای سنگ آهن با گازهای سنتز شده غنی از هیدروژن ۶- فرایند FINEX کم کربن	- جذب CO_2 با محلول آمونیاک - فرایند FINEX کم کربن
COURSE50 (Japan)	فدراسیون آهن و فولاد ژاپن وزارت صنعت، تجارت و افتصاد	توسعه تکنولوژی‌های مبتکرانه برای حل معضلات زیست محیطی زمین، مشتمل بر پروژه های R&D، ارتباطات عمومی و بهبود رابطه صنعت/دانشگاه	- سناریو سازی برای کاهش گرمایش زمین - جداسازی و ذخیره CO_2 - جذب CO_2 توسط گیاهان
ULCOS (I & II) (EU)	کلیه تولیدکنندگان اصلی فولاد در اتحادیه اروپا، شرکای بخش انرژی و مهندسی، دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی و کمسیون اروپا	همکاری در تحقیق و توسعه جهت کاهش سریع نشر CO_2 حاصل از تولید فولاد مشتمل بر دانش فنی، مهندسی، اقتصاد و پیش بینی تغییرات آب و هوایی	- بازیافت گاز خروجی کوره بلند به همراه جذب و جداسازی CO_2 (CCS) - HIsarna همراه با CCS - احیای مستقیم پیشرفته همراه با CCS - الکترولیز سنگ آهن
Blue Scope Steel (Australia)	شرکت‌های فولادسازی استرالیا Post Kembla Steelworks	استفاده بهینه از منابع طبیعی کاهش زباله و بازیافت آنها	- تکنولوژی توسعه یافته مصرف بهینه انرژی

در صورت ترکیب شدن با فرایند CCS، هدف کاهش ۵۰ درصدی نشر CO_2 را تأمین می کنند.

با اینکه CCS راه حل نوید بخشی در کاهش نشر CO_2 به شمار می‌رود ولی منجر به کاهش بهره‌وری کلی کارخانه می‌شود. زیرا این فرایند برای تولید مجدد حلال در خلال جذب CO_2، انرژی زیادی مصرف می‌کند. بنابراین ترکیب تکنولوژی‌های جذب و بکارگیری CO_2 (CCU) به همراه بازیابی انرژی حرارتی تلف شده توسط گازهای خروجی و سرباره‌های مذاب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا به کمک آن می توان CCS را از سال ۲۰۳۵ به بعد در صنایع فولاد بکار گرفت. با CCU گاز CO_2 به محصولی ارزشمند تبدیل می‌گردد و می‌تواند کاربردهایی نظیر تولید هیدروکربن‌های پیشرفته، مینرالیزه شدن یا تولید ترکیبات شیمیایی داشته باشد.

فرایندهای احیای سنگ آهن با هیدروژن یا زیست توده علیرغم دورنمای جذاب، معضلات و چالش‌های زیادی پیش رو دارند. این فرایندها فعلاً به بررسی و مطالعه زیادی نیاز دارند تا بتوانند به مرحله تجاری سازی برسند.

در خاتمه باید گفت هیچکدام از تکنولوژی های کاهش نشر CO_2 در حال حاضر هنوز به تکنولوژی کاربردی برای صنعت فولاد تبدیل نشده‌اند. زیرا هنوز نیاز به تکامل و کسب اعتبار و مقبولیت بیشتر تا سطحی مناسب دارند. مانع اولیه در این راه، مهیا شدن و در دسترس قرار گرفتن تکنولوژی است که نیاز به تحقیقات طاقت فرسا و تلاش برای توسعه در مقیاس‌های بزرگتر آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی دارد. در بخش فولاد، تکنولوژی CCS می‌تواند از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ در صنعت بکار گرفته شود. زیرا پیش بینی می شود تا آن زمان کلیه موانع فنی و مالی برطرف خواهد شد.

۹. منابع

[1] Suopajärvi H, Pongrácz E, Fabritius T. Bioreducer use in Finnish blast furnace iron making–analysis of CO2 emission reduction potential and mitigation cost. Appl Energy 2014; 124:82–93.
[2] E.E. Commission. Analysis of options to move beyond greenhouse gas emission reductions and assessing the risk of carbon leakage. Commission Staff working document, SEC650, 2010.
[3] E. Roadmap 2050. Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions, COM (2011)885/2. Brussels: European Commission; 2011.
[4] Fischedick M, Marzinkowski J, Winzer P, Weigel M. Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. J Clean Prod 2014; 84:563– 80.
[5] Pardo N., Moya J., Vatopoulos K. Prospective scenarios on energy efficiency and CO2 emissions in the EU iron steel Ind. 2012. Publications Office.
[6] Helle H. Towards sustainable iron and steelmaking with economic optimization. 2014. [7] Onarheim K, Mathisen A, Arasto A. Barriers and opportunities for application of CCS in Nordic industry—a sectorial approach. Int J Greenh Gas Control 2015; 36:93–105.
[8] Hasanbeigi A, Arens M, Price L. Alternative emerging iron making technologies for energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction: a technical review. Renew Sustain Energy Rev 2014; 33:645–58.
[9] Morfeldt J, Nijs W, Silveira S. The impact of climate targets on future steel production an analysis based on a global energy system model .J Clean Prod 2014.
[10] Patel P, Seetharaman S. A test of the steel industry's metal. MRS Bull 2013; 38 (09):680–1.
[11] Burchart-Korol D. Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study. J Clean Prod 2013; 54:235–43.
[12] GHG I. Iron and Steel CCS Study (Techno-Economics Integrated Steel Mill).In: IEA GHG Report 2013/04, July 2013, IEA GHG.
[13] Thompson S, Si M. Strategic analysis of energy efficiency projects: case study of a steel mill in Manitoba. Renew Sustain Energy Rev 2014; 40:814–9.
[14] Flues F, Rübbelke D, Vögele S. An analysis of the economic determinants of energy efficiency in the European iron and steel industry. J. Clean Prod 2015.
[15] Germeshuizen LM, Blom P. A techno-economic evaluation of the use of hydrogen in a steel production process, utilizing nuclear process heat. Int J Hydrogen Energy2013; 38(25):10671–82.
[16] Lin B, Wang X. Carbon emissions from energy intensive industry in China: evidence from the iron & steel industry. Renew Sustain Energy Rev 2015; 47:746–54.
[17] Advanced Manufacturing Office (AMO). 2014, U.S. Department of Energy (U.S. DOE).
[18] Åhman M, Nikoleris A, Nilsson LJ. Decarbonising industry in Sweden-an assessment of possibilities and policy needs. Lund University; 2012.
[19] Kasai E., Recent resource and environmental issues in the steel industry. In: Tanaka Y, Norton M, Li Y-Y, Editors. Topical themes in energy and resources, Japan: Springer; 2015. p. 215–227.
[20] Burchart-Korol D, Pichlak M, Kruczek M. Innovative technologies for greenhouse gas emission reduction in steel production. Metalurgija 2016; 55 (1):119–22.
[21] Birat J.-P., Borlee J., Korthas B., Stel J.vander, Meijer K., Günther C., Halin M., Bürgler T., Lavelaine H., Treadgold Ch., et al. ULCOS program: a progress report in the Spring of 2008, SCANMETIII. In: Proceedings of the 3rd international conference on process development in iron and steel making. Luleå, Sweden; 2008.
[22] Birat J.-P. The sustainability of Steel: iron as a backbone of urban and societal metabolism. In: Proceedings of the international steel technologies symposium. 2008. Taiwan.
[23] Quader MA, et al. A comprehensive review on energy efficient CO2 breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. Renew Sustain Energy Rev 2015; 50:594–614.
[24] Association WS. World steel in figures 2011. World Steel Assoc. 2011; 2.
[25] Fallot A, et al. Biomass sustainability, availability and productivity. Revue de métallurgie 2009; 106(10):410–8.
[26] Birat J.-P. CCS and the steel industry. In: Proceedings of the international conference on CCS regulation for the EU and China 2009.
[27] Birat J., Maizière-lès-Metz. Steel sectorial report—Contribution to the UNIDO roadmap on CCS1-fifth draft Global Technology Roadmap for CCS in Ind. United Nations Ind. Dev. Organization, Vienna, Austria; 2010.
[28] Birat J.-P. Addressing the climate change challenge: ULCOS breakthrough program In: Proceeding of the 157th ISIJ meeting on international organized sessions, environmental and energy technology/high temperature processes. Tokyo, Japan CAMP-ISIJ; 2009.
[29] Birat J.-P., J-P.L., the "CO2 tool": emissions and energy consumption of existing and breakthrough routes in a future studies framework. Larevuede Métal- lurgie – CIT 2009:337–49.
[30] Commission E. ULCOS-Perspectives. [Cited 2014 11 September]; Available from: http://www.ulcos.org/en/about_ulcos/perspectives.php .
[31] ULCOS Structure and financing. [Cited 2014 21 September]; Available from: http://www.ulcos.org/en/about_ulcos/structure_refinancing.php .
[32] Birat J., et al. ULCOS PROGRAM: AN UPDATE IN 2012.In: Proceedings of 4th international conference on process development in iron and steelmaking (SCANMET IV). Luleå, Sweden.2012.
[33] Porzio GF, et al. Reducing the energy consumption and CO2 emissions of energy intensive industries through decision support systems–an example of application to the steel industry. Appl Energy 2013; 112:818–33.
[34] Birat J., Hanrot F., Maizières-lès-Metz F. ULCOS: The European steel industry's effort to find breakthrough technologies to cut its CO2 emissions significantly. In: Proceedings of the EU/Asia workshop on clean production and nanotechnologies. Seoul, South Korea; 2006.
[35] Siitonen S, Tuomaala M, Ahtila P. Variables affecting energy efficiency and CO2 emissions in the steel industry. Energy Policy 2010; 38(5):2477–85.
[36] Afanga K., Mirgaux Olivier, Patisson Fabrice. Assessment of top gas recycling blast furnace: A technology to reduce CO2 emissions in the steelmaking industry. In: Proceedings of the carbon management technology conference. 2012.
[37] Hattink M., et al. Developments of the ULCOS Low CO2 Blast Furnace Process at the LKAB Experimental BF in Luleå.
[38] Danloy G, et al. ULCOS-pilot testing of the low-CO2 blast furnace process at the experimental BF in Luleå. Revue de Métallurgie 2009; 106(01):1–8.
[39] Top Gas Recycling. 2014 [cited 2014 15/08]; Available from: http://ulcos.org/ en/research/blast_furnace.php .

[40] Wyns, T. The low carbon future of the European steel sector, CENTER FOR CLEAN AIR POLICY EUROPE European Parliament 2012.
[41] Guangqing Z, Hirsch A. The trial of the top gas recycling blast furnace at LKAB s' EBF and scale-up. La Revue de Metallurgie 2009: 387–92.
[42] vander Stel J., et al. Developments of the ULCOS low CO2 blast furnace process at the LKAB experimental BF in Luleå. In: Proceedings of the1st international conference on energy efficiency and CO2 reduction in the steel industry. 2011. Düsseldorf.
[43] vander Stel J., Sert D., Hirsch Ing., A. Eklund N., Sundqvist Ökvist L. TOP gas recycle blast furnace developments for low CO2 iron making, 2012 [cited2014 08 September]; Availablefrom:www.ulcos.org.
[44] Vander Stel J., et al. ULCOS Top Gas Recycling Blast Furnace Process (ULCOS TGRBF): Final Report.2014: Publications Office.
[45] ULCOS. HIsarna smelter technology. 2014 [cited201415August]; Available from: http://www.ulcos.org/en/research/isarna.php .
[46] Assefa G, et al. ORWARE: an aid to environmental technology chain assessment. J Clean Prod 2005; 13(3):265–74.
[47] ULCOS. ULCORED. 2014 [cited201415August]; Availablefrom: http://www. ulcos.org/e n/research/advanced_direct_reduction.php .
[48] Fu JX, etal. Carbon reduction programs and key technologies in global steel industry. J Iron Steel Res, Int2014; 21(3):275–81.
[49] Staal, B.M. ULCOS=Ultra Low CO2 Steel making. 2004 [cited201420July]; Available from: http://www.sustainableinsteel.eu/p/532/ulcos_=_ ultra_low_ co2_steel_making.html .
[50] Abbasi M, et al. A feasibility study for synthesis gas production by considering carbon dioxide capturing in an industrial-scale methanol synthesis plant. Arab J Sci Eng 2015; 40(5):1255–68.
[51] YANMAZM, KAYAD. Ultra–low carbon dioxide (CO2) steelmaking. Eng Sci Technol Int J 2012;15:2.
[52] Hsu CK, etal. Reduction of energy consumption and pollution emissions for industrial furnace using hydrogen-rich tail gas. Int J Hydrogen Energy 2014; 39 (18):9675–80.
[53] Chen WH, et al. An evaluation of hydrogen production from the perspective of using blast furnace gas and coke oven gas as feed stocks. Int J Hydrogen Energy 2011; 36(18):11727–37.
[54] Chen WH, et al. Hydrogen production from steam reforming of coke oven gas and its utility for indirect reduction of iron oxides in blast furnace. Int J Hydrogen Energy 2012; 37(16):11748–58.
[55] Yan XL, et al. Study of a nuclear energy supplied steel making system for near- term application. Energy 2012; 39(1):154–65.
[56] Kasahara S, Inagaki Y, Ogawa M. Flow sheet model evaluation of nuclear hydrogen steelmaking processes with VHTR-IS(very high temperature reactor and iodine–sulfur process).ISIJ Int 2012; 52(8):1409–19.
[57] Ranzani Da Costa A, Wagner D, Patisson F. Modelling a new, low CO2 emissions, hydrogen steelmaking process. J Clean Prod 2013; 46:27–35.
[58] Ranzani da Costa A, et al. Modélisation d'un four àcuve de reduction directe du minerai de fer par l'hydrogène pur. Revue de Métallurgie 2009; 106 (10):434–9.
[59] Nogami H, Yagi Ji, Sampaio RS. Energy analysis of charcoal charging operation of blast furnace. ISIJ Int 2004; 44(10):1646–52.
[60] Alakangas, E. Properties of wood fuels used in Finland, Technical Research Centre of Finland, VTT Processes. Project Report Pro 2/ P2030/05(Project C5SU00800), 2005.
[61] Suopajärvi H, Pongrácz E, Fabritius T. The potential of using biomass-based reducing agents in the blast furnace: A review of thermochemical conversion technologies and assessments related to sustainability. Renew Sustain Energy Rev 2013; 25:511–28.
[62] Srivastava U, Kawatra SK, Eisele TC. Production of pig iron by utilizing biomass as a reducing agent. Int J Miner Process 2013; 119:51–7.
[63] ULCOS. Carbon Capture and Storage (CCS). [cited201415October]; Available from: http://www.ulcos.org/en/research/carbone_capture_ storage.php .
[64] Hooey L, et al. Techno-economic study o anintegrated steel works equipped with oxygen blast furnace and CO2 Capture. Energy Proced 2013; 37:7139–51.
[65] Rootzén J, Johnsson F. Exploring the limits for CO2 emission abatement in the EU power and industry sectors—awaiting a breakthrough. Energy Policy 2013; 59:443–58.
[66] Saima WH, Mogi Y, Haraoka T. Development of PSA system for the recovery of carbon dioxide and carbon monoxide from blast furnace gas in steelworks. Energy Proced 2013; 37:7152–9.
[67] Romano MC, et al. Application of advanced technologies for CO2 capture from industrial sources. Energy Proced 2013; 37:7176–85.
[68] Goff F, Lackner K. Carbon dioxide sequestering using ultramafic rocks Environ Geosci 1998; 5(3):89–101.
[69] Rawlins CH, et al. Sequestration of CO2 from steelmaking off gas by carbonate formation with slag. Assoc Iron Steel Technol AIST 2006.
[70] Croezen, H. and Korteland, M. Technological developments in Europe: a long-term view of CO2 efficient manufacturing in the European region: Report. 2010: CE Delft.
[71] Meijer, K., ULCOS, Ultra Low CO2 Steelmaking. Presentation given at 25 September 2008.
[72] Link, J., RMA–Flow sheet model-examples of application ijmuiden: corus research development & technology, In: Proceedings of the 4th ULCOS seminar. 2008.
[73] Birat J., Carbon dioxide (CO2) capture and storage technology in the iron and steel industry. Developments and innovation in carbon dioxide (CO2) Capture and Storage Technology, 2010. 1: p.492–521.
[74] Association W. Sustainable steel: at the core of a green economy.Belgium:Brussels; 2012.
[75] Naito M., Matsuzaki S., Yonezawa K., Saito K. Possibility of hydrogen reduction in iron making process (COURSE50 program in Japan). In: Proceedings of the 157th ISIJ meeting, international organized sessions, environmental and energy technology/high temperature processes. 2009. Tokyo, Japan CAMP-ISIJ.
[76] Tonomura S. Outline of Course 50. Energy Proced 2013; 37:7160–7.
[77] Birat J.and Maizière-lès-Metz D. Steel sectorial report. Contribution to the UNIDO roadmap on CCS1-fifth draft JP. Birat, ArcelorMittal Global R & D, Maizières-lès-Metz, France, 2010.
[78] Kim H, et al. The influence of electrolyte basicity on the performance of an iridium anode for the electrolysis of molten iron oxide. J Electrochem Soc 2011; 158:E101–5.
[79] Pinegar HK, Moats MS, Sohn HY. Process simulation and economic feasibility analysis for a hydrogen-based novel suspension ironmaking technology. Steel Res Int 2011; 82(8):951–63.
[80] Institute, A.I.a.S. Steel Industry Developing Technical Solutions to Climate Change by Reducing Steel Making Emissions and Energy Intensity 201 [cited 20158/05/2015]; Available from: https://www.steel.org/Recycle-Steel_org/ Web%20Root/Sustainability/Energy%20Reduction/CO2%20 Breakthrough.aspx .
[81] Birat J. Mitigation of Greenhouse Gas emissions in the Steel sector, with a focus on biomass issues III Conférencia regional sobre mudanças globais: Am. do Sul, SaõPaulo; 2007. p. 4–8. M.

راهنمـــای تهیـــه و تدویـــن مقـالات فصلنامـه آهـن و فولاد

اهداف فصلنامه:

- ✓ انتقال تجارب علمی و کمک به نشر دانش
- ✓ فراهم کردن زمینه های ارتباط علمی بین صنایع و دانشگاهها
- ✓ انتشارات مفاهیم تجربه شده در میدان عمل
- ✓ معرفی فعالیت های علمی و اجرایی فولاد مبارکه
- ✓ انتشار اخبار مهم فولاد در جهان، ایران و اخبار داخلی شرکت فولاد مبارکه اصفهان

شرایط پذیرش مقالات:

- ➢ مقاله باید در یکی از موضوعات زیر باشد :
  - ✓ محصولات فولادی
  - ✓ تکنولوژی تولید فولاد
  - ✓ فنی و مهندسی
  - ✓ مدیریت
  - ✓ ایمنی، بهداشت و محیط زیست
  - ✓ کاهش هزینه
- ➢ دارای جنبه های علمی و پژوهشی قوی باشد.
- ➢ حاوی ایده های جدید، نکات کاربردی، عملی، جدید و نو باشد.
- ➢ اصول و قواعد نگارش مورد نظر این مجله رعایت گردد.
- ➢ مسئولیت صحت مطالب مندرج در مقاله به عهده نویسنده یا نویسندگان می باشد.

شرایط تدوین مقالات:

- ➢ مقاله در محیط نرم افزاری WORD و دارای حاشیه از بالا و پایین ۳ سانتیمتر و چپ و راست ۲.۵ سانتیمتر و فاصله خطوط۰.۸ سانتیمتر به زبان فارسی تایپ و از طریق سامانه http://ironand-steel.msc.ir بارگذاری گردد.
- ➢ مقاله دارای چکیده حداکثر ۱۵۰ کلمه و حجم مقاله حداکثر۱۵ صفحه باشد و واژگان کلیدی حداقل ۴ و حداکثر ۸ کلمه.
- ➢ مقاله های ارسالی باید دارای بخش های زیر باشد:
  - o عنوان کامل مقاله، نام نویسنده یا نویسندگان، رشته علمی و مسئولیت نویسنده یا نویسندگان، نام مؤسسه یا دانشگاه، محل کار، نشانی کامل(آدرس،تلفن،پست الکترونیک و)...
  - o بیان مسأله، اهمیت مسأله، اهداف پژوهش، ادبیات موضوع، چهارچوب نظری، فرضیه‌های پژوهش، روش تحقیق، فنون تجزیه و تحلیل، نتیجه گیری و ذکر منابع (مقالات پژوهشی)
  - o برای مقاله‌های مروری چکیده، مقدمه، متن مقاله، ارائه چارچوب ادراکی، جمع بندی و ذکر منابع لازم است.
- ➢ ارجاعات در متن و پایان مقاله به رو ش‌های زیر باشد:

الف - مرجع نویسی داخل متن باید در داخل پرانتز و به صورت نام خانوادگی نویسنده، تاریخ انتشار و شماره صفحه باشد.

ب - مرجع نویسی پایان مقاله بایستی براساس نمونه های زیر به ترتیب الفبایی نام خانوادگی نویسندگان مرتب شود.

ج - در مورد مقالات، نام خانوادگی، نام، تاریخ انتشار، عنوان مقاله، نام مجله، شماره مجله، شماره صفحه

د -در مورد کتاب، نام خانوادگی، نام، تاریخ انتشار، عنوان کتاب، محل انتشار، ناشر

- ➢ عنوان، توضیحات و شماره جداول، الگوها و اشکال، در بالای آن ذکر شود.
- ➢ مجله در ویرایش مقاله ها، بدون تغییردر اصل و محتوا آزاد است.
- ➢ مقاله های رسیده برگشت داده نمی شود.
- ➢ به پیوست یک قطعه عکس با dpi۳۰۰ از نویسنده یا نویسندگان به همراه ایمیل و شماره تلفن همراه دریافت می شود.

دستورالعمل داوری مقالات مجله آهن و فولاد

اهداف:

- ➢ داوری علمی مقالات واصل شده
- ➢ حرکت در جهت علمی تر شدن محتوای فصلنامه
- ➢ استفاده از نظرات صاحب نظران در غنی کردن فصلنامه

مراحل:

- ➢ مقالات واصله که در راستای موضوعات فصلنامه می باشند استخراج و مقوله بندی می شوند.
- ➢ مقالات بر حسب تخصص علمی برای دو نفر از اعضاء داوران علمی جهت داوری ارسال می گردد.
- ➢ حداکثر دو هفته به داوران فرصت داده می شود که نظرات و نتیجه داوری خود را مطابق فرم پیوست ارائه نمایند.
- ➢ در صورتی که دو نفر داور در مورد قابل چاپ بودن مقالات در مجله نظر مثبت داشته باشند، مقالات به صورت مقدماتی پذیرش می شوند.
- ➢ مقالاتی که معدل نمرات دو نفر داور بر اساس فرم داوری بین ۳۹- ۵۰باشد به صورت چاپ برای فصلنامه انتخاب می گردند (در صورت زیاد بودن مقالات، مقالات دارای رتبه بالاتردر الویت چاپ هستند)
- ➢ جهت اشتراک دو ماهنامه آهن و فولاد فرم زیر را به نشانی پستی زیر ارسال فرمائید :

استان اصفهان ، شهر مبارکه، صندوق پستی ۱۶۱- ۸۴۸۱۵ واحد اطلاعات و انتشارات روابط عمومی - دو ماهنامه آهن و فولاد.

فرم اشتراک

نام: ..... نام خانوادگی: ..... نام پدر: ..... تاریخ تولد: .....

قسمت یا واحد فعالیت:..... تحصیلات: .....شغل: .....

نشانی:.....تلفن تماس: .....

کد پستی:.....

صنعت فولاد

پیشران اقتصاد غیرنفتی

www.msc.ir