



شماره چهل و هفتم، مرداد شهریور ماه
سال ۱۳۹۷

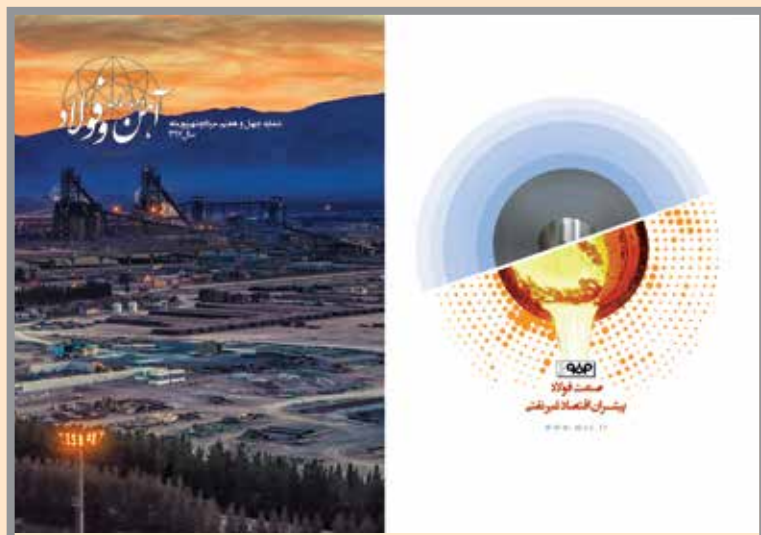




مجموعه
فولاد
مبارک



دوماهنامه آهن و فولاد
شماره چهل و هفتم، مهر و آبان ماه
سال ۱۳۹۷



فهرست

تکنولوژی قالب هوشمند مجهز به سیستم تنظیم پهنای قالب

۲ گردآوری: تحقیق و توسعه شرکت فولادمبارک



برنامه‌های موفقیت آمیز در زمینه کاهش چشم گیر CO_2
در صنعت فولاد (بخش اول)

۴ گردآوری: تحقیق و توسعه شرکت فولادمبارک



سرباره یک محصول جانبی صنایع فولادسازی

۶ گردآوری: تحقیق و توسعه شرکت فولادمبارک



ارائه راه کارهایی جهت کاهش مصرف انرژی در کوره احیا مستقیم
میدرکس و کوره قوس الکتریکی

۸ پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان



ارزیابی جامع جهت کاهش مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2
در صنایع آهن و فولاد بر پایه آنالیز جریان مواد دینامیک

۳۷ پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان



راهنمای تهیه و تدوین مقالات دوماهنامه آهن و فولاد

۶۴



صاحب امتیاز: شرکت فولاد مبارک اصفهان
مدیر مسئول: در حال تغییر
سر دبیر علمی: مسعود هراتیان

سر دبیر اجرایی: رسول مهماندوست
دبیر اجرایی: سجاد امیری فارسانی

هیات تحریریه:

شهرام عباسی

محمد ناظمی هرندي

طهمورث جوانبخت

غلامرضا طاهری

مسعود هراتیان

علی مالکی

ابوذر طاهری زاده

نشانی:

اصفهان، شرکت فولاد مبارک اصفهان

تلفن: ۰۳۱-۵۲۷۳۳۴۵۰

دورنگار: ۰۳۱-۵۲۷۳۳۷۸۰

آدرس اینترنتی:

<http://ironandsteel.msc.ir>

نشریه در حکم 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 آرای: گرافیک نقطه

۰۹۱۳۳۰۰۸۱۹۳

چاپ: آرمان نو



(گردآوری: تحقیق و توسعه)

اشاره کرد. امروزه سیستم های تنظیم کننده پهنای قالب های تختال بوسیله درایوهای سیلندری الکترومکانیکی یا پلکانی تجهیز می شوند. در فناوری DynaWidth که بوسیله شرکت زیمنس-وای توسعه یافته است، از سیستم های هیدرولیکی برای تنظیم سریع پهنای قالب بصورت کنترل از راه دور استفاده می شود بدون آنکه نیازی به کاهش سرعت ریخته گری باشد (شکل ۲). همچنین این دستگاه کمترین میزان پس زنی مکانیکی، بالاترین دقت هدایت تختال و کمترین طول انتقال تختال^۴ را در مقایسه با روش های متداول ارائه می کند.

اجزای اصلی سیستم DynaWidth عبارتند از سیلندرهای هیدرولیکی همراه با موقعیت سنج غیر تماسی مجتمع (آلتراسونیک)^۵، سطح باریک^۶ و بلوک دریچه همراه با دریچه کنترل موقعیت. تنظیم پهنای بوسیله ۴ درایو هیدرولیکی به ازای هر قالب، که مستقیماً به سطح باریک قالب اتصال یافته اند، انجام می شود. اجزای اصلی سیستم DynaWidth در شکل ۴ نشان داده شده است.

سیستم های تنظیم پهنای متداول اغلب نیازمند کاهش سرعت ریخته گری و در نتیجه کاهش میزان خروجی هستند. اما، سیستم DynaWidth امکان تنظیم پهنای تختال را بدون محدودیت و در هر سرعت ریخته گری فراهم می کند. بنابراین، میزان محصول تولیدی می تواند چندین درصد افزایش یابد.

فرآیند ریخته گری پیوسته، فلز مذاب را بر اساس یک فرایند مداوم به جامد تبدیل می کند. این فرایندها مؤثرترین راه برای جامد کردن حجم زیادی از فلز و تبدیل آن ها به اشکال ساده است. در این روش ماده مذاب به شمشال، شمشه و تختال تبدیل می شود. نقش قالب در ماشین ریخته گری، شکل دهی به مواد مذاب بوده و مذاب پس از عبور از درون محفظه قالب، با مقطع به شکل مکعب یا مکعب مستطیل از آن خارج می گردند. استفاده از قالب های هوشمند می تواند به افزایش بازدهی این فرایند کمک بسزایی کند.

در ریخته گری مداوم تختال، قالب ریخته گری هسته ماشین ریخته گرمحسوب می شود که ویژگی های آن کیفیت سطح نهایی تختال را مشخص می کند. قالب هوشمند برای جلوگیری از هرگونه تغییر شکل در پوسته استرنند طراحی شده است. هر صفحه مسی به یک صفحه پشتیبان با قابلیت تغییر سریع محکم شده است و تشکیل یک کاست قابل تغییر^۳ را می دهد که توسط پیچ های اتصال به دیواره پشتیبان قالب متصل می شود. با بکارگیری این روش کاست، زمان Turnaround قالب را تا بیش از ۵۰ درصد کاهش می دهد. تصویر قالب هوشمند در شکل ۱ ارائه شده است.

ویژگی اصلی قالب هوشمند وجود کاست های قالب است که مزایایی را از نظر عملکرد و نگهداری ارائه می کنند؛ از جمله این مزایا می توان به پشتیبانی کامل از عملیات تنظیم عرض قالب با بکارگیری سیستم تنظیم پهنای سریع قالب



شکل ۱. قالب هوشمند برای ریخته گری پیوسته تختال.

1- SmartMold

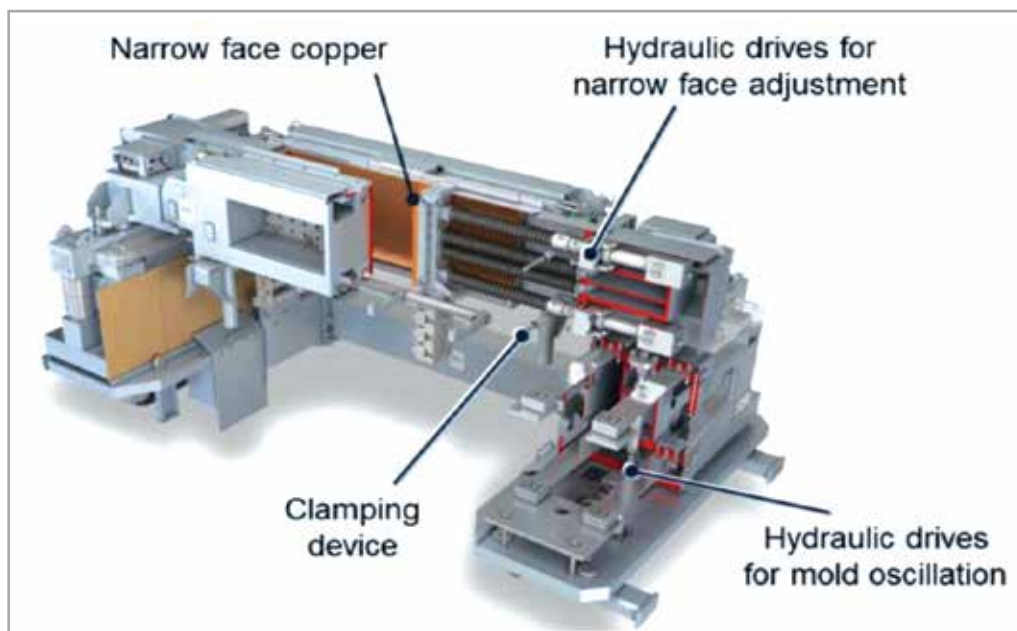
2- DynaWidth

3- Changeable cassette

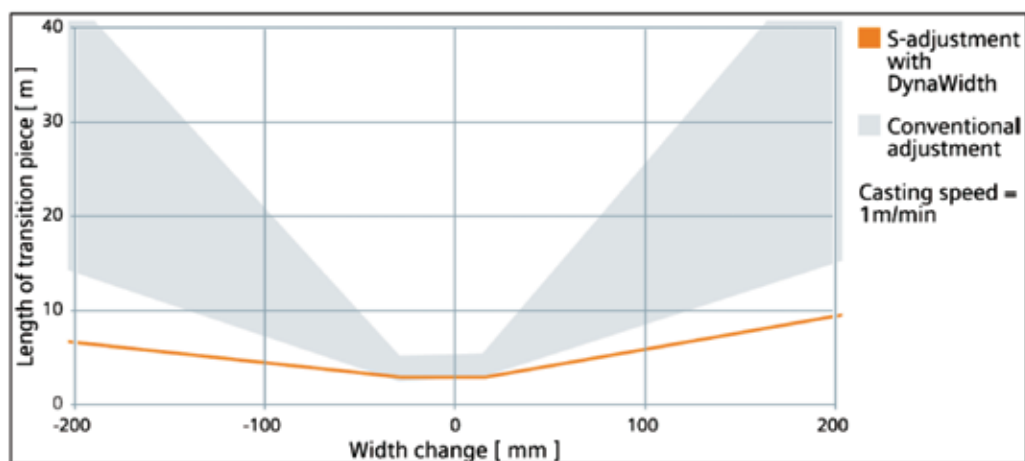
4- Slab transition length

5- Hydraulic cylinder with integrated non-contact (ultrasonic) position measurement

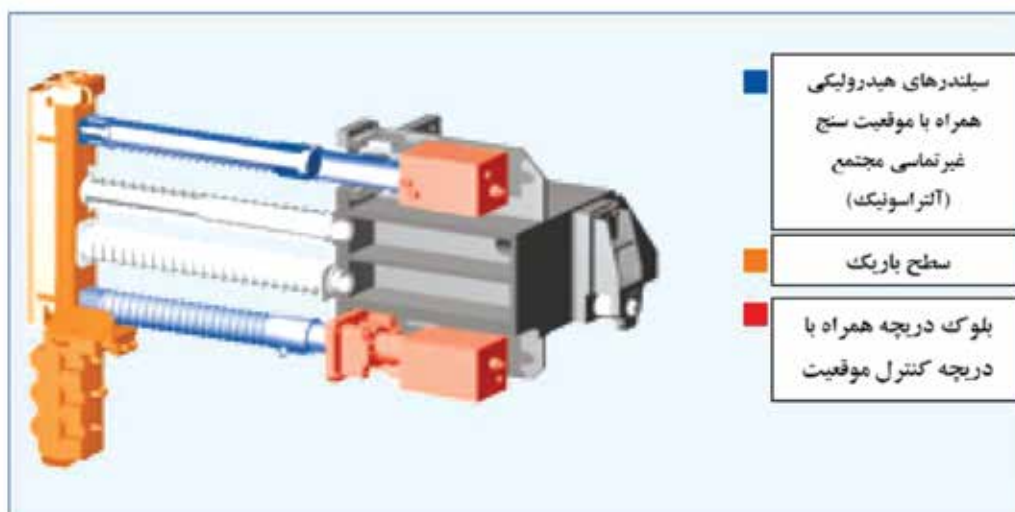
6- Narrow face



شکل ۲. تنظیم پهنای تختال با بکارگیری سیستم تنظیم سریع پهنای قالب.



شکل ۳. مقایسه روش های DynaWidth با روش های متداول کنترل پهنای از نظر میزان طول انتقالی تختال.



شکل ۴. اجزای سیستم DynaWidth برای تنظیم سریع پهنای قالب.

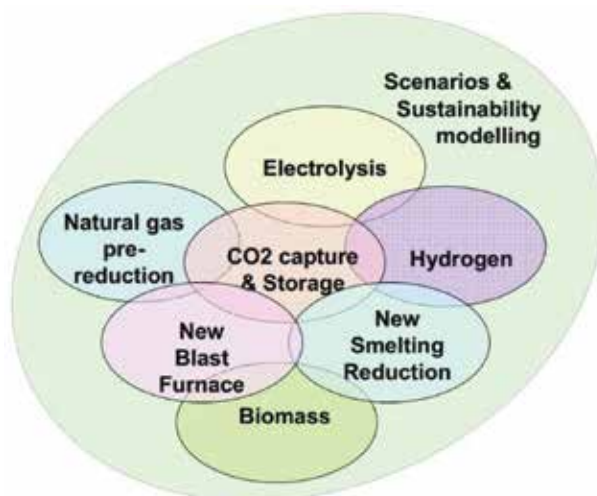
آکادمیک در سرتاسر جهان فراخوانده شدند؛ که هدف آن‌ها شناسایی تکنولوژی‌های تولید فولاد برای کاهش بخش عمده‌ای از انتشارات CO₂ می‌باشد. آن‌ها تکنولوژی‌های مختلفی را در ابعاد مختلف از بعد آزمایشگاهی تا توسعه واحد پایلوت و در نهایت پیاده‌سازی تجاری، امکان‌سنجی کردند. برای هر یک از ابتکارات مطرح‌شده در هر منطقه، بهترین راهکارها برحسب نوع محدودیت‌های منطقه‌ای و فرهنگی مورد بررسی قرار گرفت. شرح مختصری از برنامه‌های ذکر شده، در ادامه بیان شده است:

۱- برنامه ULCOS اتحادیه اروپا

در سال ۲۰۰۴ اتحادیه اروپا فشارهای مضاعفی را به صنایع تولید فولاد جهت کاهش انتشار کربن اعمال نمود؛ که در نتیجه آن کنسرسیوم ULCOS جهت توسعه تکنولوژی‌های نوآورانه صنعت فولاد با نقش کلیدی صنعت فولاد اروپا پدید آمد. برنامه‌های ULCOS به دو فاز ULCOS I در سال ۲۰۰۴ و ULCOS II در سال ۲۰۱۰ تقسیم‌بندی می‌شود. موضوعات اصلی مطرح در کنسرسیوم ULCOS در سه حوزه افزایش بازده استفاده از کربن، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با سوخت‌های زیستی، هیدروژن و الکتریسیته و همچنین فرایند ضبط^۲ می‌باشد. این موارد به‌صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

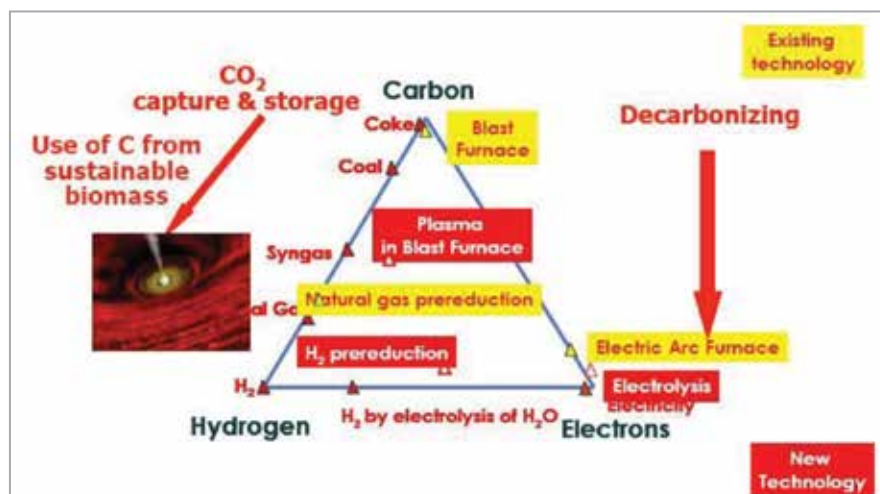
مجموعه‌ای از جدیدترین تکنولوژی‌های پیشرفته در زمینه CO₂ برای ایجاد یک تغییر الگو در تولید صنعتی ضروری بوده و می‌تواند فرایندها و روش‌های تولید فولاد در سرتاسر جهان را دستخوش تغییر کند. از این رو برای مقابله با انتشار گاز CO₂، دولت‌ها و سازمان‌های بین‌المللی نیازمند نوآوری و اجرای تکنولوژی‌های جدید و پایه‌ای برای تولیدی با حداقل انتشارات مضر هستند. در سال ۲۰۰۳ انجمن جهانی فولاد برنامه‌های دستیابی به موفقیت در زمینه CO₂ را آغاز نمود. بطوریکه سازمانها و شرکت‌های مختلفی در حال انجام تحقیقات و بررسی‌های جامع در زمینه کاهش انتشارات CO₂ در صنعت فولاد در سرتاسر جهان می‌باشند. این شرکت‌ها و سازمانها عبارتند از:

- * اتحادیه اروپا، برنامه‌های ULCOS^۱ و ULCOS II
 - * ایالت متحده آمریکا، انستیتو آهن و فولاد آمریکا
 - * کانادا، انجمن تولیدکنندگان فولاد کانادا
 - * آمریکای جنوبی، شرکت ArcelorMittal برزیل
 - * ژاپن، فدراسیون آهن و فولاد ژاپن
 - * کره، شرکت POSCO
 - * چین، شرکت Baosteel و تایوان شرکت China Steel
 - * استرالیا، همکاری شرکت‌های BlueScope Steel و One Steel
 - CSIRO
- تحت برنامه‌های ذکر شده، طیف وسیعی از متخصصین صنعتی و دانشمندان علمی از آزمایشگاه‌ها و انستیتوهای



شکل ۱: موضوعات اصلی مطرح در کنسرسیوم ULCOS.

1- Ultra Low CO2 Steelmaking
2- capture



شکل ۲: مسیرهای تکنولوژی‌های پیشرفت برنامه ULCOS.

تا سال ۲۰۰۶ تکنولوژی‌های مختلف زیادی مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفت و از این میان ۴ تکنولوژی که امید بیشتری به آن‌ها بود جهت ارزیابی و آزمون‌های گسترده‌تر؛ انتخاب گردید. این ۴ تکنولوژی‌های مورد نظر عبارتند از:

- * فرایند^۱ TGR-BF، بر پایه بازیافت گاز خروجی از کوره بلند
- * فرایند HIsarna، بر پایه تکنولوژی احیای مذاب سنگ آهن
- * فرایند^۲ ULCORED، بر پایه تکنولوژی احیای مستقیم با گاز طبیعی سنگ آهن

* فرایند^۳ ULCOWIN بر پایه تکنولوژی الکترولیز مستقیم سنگ آهن شمتائیک مربوط به این ۴ تکنولوژی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دو تکنولوژی بر پایه زغال سنگ نرم و بدون نیاز به پروسه کک سازی، یکی بر پایه گاز طبیعی و دیگری بر پایه استفاده از انرژی الکتریکی می‌باشد. در بخش دوم این مقاله، برنامه‌های کشورهای ژاپن، کره جنوبی، آمریکا، استرالیا، تایوان و چین جهت کاهش انتشارات CO₂ در صنعت فولاد به‌طور خلاصه معرفی می‌شود. امید است با دیدی روشن نسبت به تکنولوژی‌های نوین، قدم در راهی مطمئن در صنعت فولاد کشور برداشته شود.

هدف اصلی این پروژه غول‌پیکر، یافتن راه‌حل‌های نوآورانه و دستیابی به راهکاری موفقیت‌آمیز جهت کاهش انتشار CO₂ مربوط به فولاد به میزان حداقل ۵۰ درصد تا سال ۲۰۵۰ میلادی می‌باشد. به‌طوری که میزان تولید CO₂ از ۲ تن به ۱ تن برای تولید هر تن فولاد کاهش یابد. در کنار این، برای تولیدات صنعتی با حجم بالا بایستی تکنولوژی‌های بالقوه و قابل امکان را توسعه داد. مفهوم پیشنهاد شده توسط ULCOS برای دستیابی به موفقیت در زمینه کاهش CO₂ در شکل ۲ نشان داده شده است.

این ماتریس مثلثی بیانگر چگونگی انتخاب عوامل و سوخت‌ها از سه امکان موجود شامل کربن، هیدروژن و الکترون می‌باشد. در این دیاگرام سه‌تایی تمام منابع انرژی ارائه شده است؛ که زغال سنگ نزدیک به کربن بر روی خط کربن-هیدروژن، گاز طبیعی نزدیک به هیدروژن و هیدروژن تولید شده از الکترولیز آب بر روی خط الکتروسیسته، هیدروژن می‌باشد. تکنولوژی‌های تولید فولاد بر پایه زغال سنگ یعنی عمدتاً بر پایه کربن، گاز طبیعی، مخلوط کربن و هیدروژن و کوره قوس الکتریکی در جعبه‌های زرد در شکل نشان داده شده است.

Coal & sustainable biomass		Natural gas	Electricity
Revamping BF	Brownfield	Revamping DR	Greenfield
TGR-BF 	HIsarna 	ULCORED 	ULCOWIN ULCOLYSIS 
Pilot tests (1.5 t/h) Demo phase launched	Pilot plant (8 t/h) start-up 2010	Pilot plant (1 t/h) to be erected in 2011?	Laboratory pilot

شکل ۳: تکنولوژی‌های مورد مطالعه و بررسی تحت حمایت کنسرسیوم ULCOS.

- 1- top gas recovery-blast furnace
- 2- Direct-reduced iron with natural gas
- 3- Direct electrolysis of iron ore

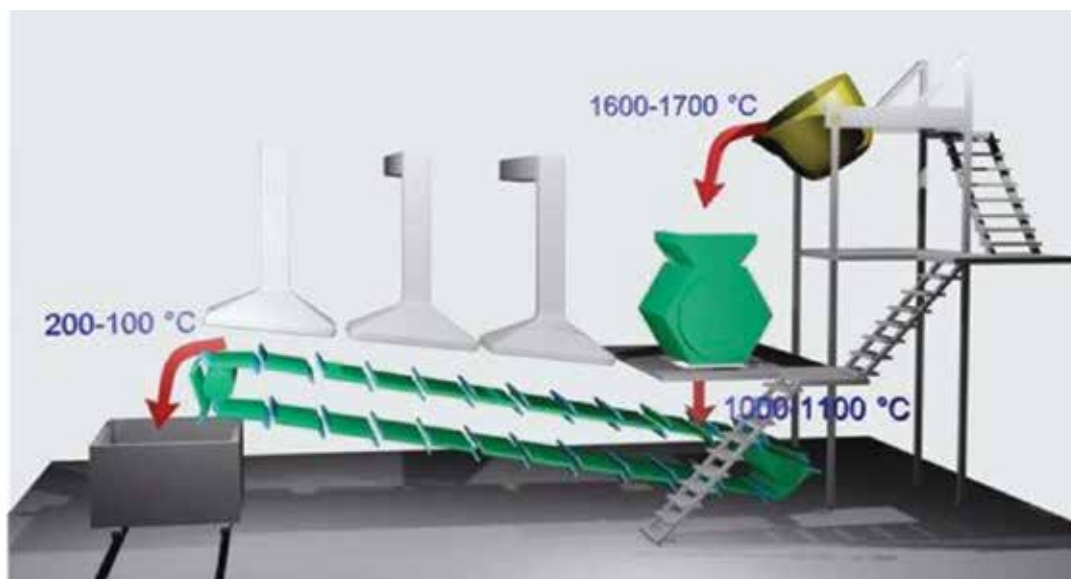
تازه‌های تکنولوژی

سرباره یک محصول جانبی صنایع فولادسازی

(گردآوری: تحقیق و توسعه)

کم‌ترین زمان تولید نمود و از دردسر بازیافت و دپو سرباره‌ها در دراز مدت که مشکلات زیست محیطی را نیز به همراه دارد، خلاص شد. همچنین در روش EcoSlag سرعت انجماد سرباره به حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه می‌رسد که علاوه بر اینکه کلوخه‌های کوچک از سرباره تشکیل می‌شود، این نرخ سرد شدن بالا مانع از انتشار ذرات آلاینده در فضا خواهد شد. علاوه بر این، این نرخ سرعت انجماد بالا باعث خواهد شد که ذرات جامد فلزی از ترکیبات پیچیده سرباره جدا شود و می‌توان با اعمال یک جدایش مغناطیسی فرایند تفکیک این دو مجموعه از مواد تولیدی را به سرانجام رسانید (شکل ۱). در پایان فرایند، قطر متوسط ذرات حاوی ترکیبات فلزی دارای اندازه بین ۰ الی ۱۰۰ میلی‌متر و جامدات

امروزه در اروپا از سرباره به‌عنوان یک محصول جانبی صنعت فولاد و چدن یاد می‌شود. یکی از کاربردهایی که سرباره دارد و استفاده از آن در دنیا مرسوم است، کاربرد آن در مصالح ساختمانی است. این ترکیبات پیچیده به‌دلیل ترشوندگی مناسب آن با بتن و وزن مخصوص کم، در مصالح ساختمانی استفاده می‌شود. به دلیل فضای مناسب کسب و کار برای صرفه جویی در مصرف انرژی جهت تبدیل این ماده پرخطر و بی‌ارزش به یک محصول ایمن و کاربردی، روشی تحت عنوان EcoSlag در روسیه ابداع شد. در این روش سرباره مذاب با دمای کنترل‌شده در یک درام سردکننده ریخته می‌شود تا سرباره را با اندازه‌های کوچک منجمد سازد. با این روش می‌توان سرباره مورد استفاده در مصالح ساختمانی را در





سرباره‌ای دارای ابعاد حدود ۰ الی ۷۰ میلی‌متر می‌باشند. از سوی دیگر، مواد با ترکیبات پیچیده که ترکیب شیمیایی آن عمدتاً شامل $\text{CaO} + \text{MgO}$ است را می‌توان مجدد به جای آهک در مذاب فولاد استفاده نمود و میزان مصرف آهک را در فولادسازی کاهش داد. درام کریستالیزاتور به صورتی است که در ابتدا سرباره مذاب با دمای ۱۴۰۰ الی ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد وارد آن می‌شود (شکل ۲) که درون آن واتر جت‌هایی تعبیه شده است. نرخ جریان مذاب ورودی به این درام بین ۳ الی ۵ دقیقه برای هر تن مذاب سرباره است. توان این دستگاه بین ۳۵ kW الی ۴۵ و وزن آن ۶۰ تن می‌باشد.



ارائه راه کارهایی جهت کاهش مصرف انرژی در کوره احیا مستقیم میدرکس و کوره قوس الکتریکی

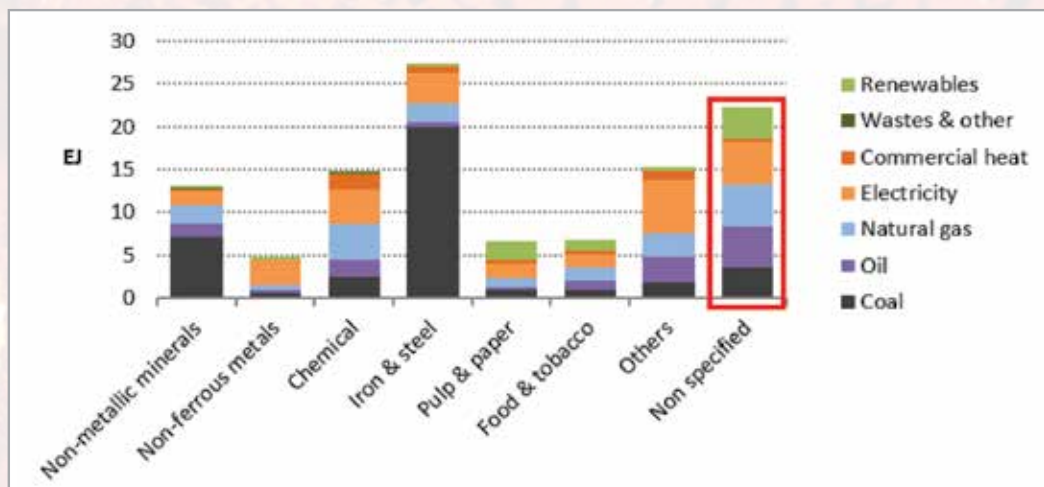
پژوهشکده فولاد-دانشگاه صنعتی اصفهان



چکیده:

موفقیت آمیز مورد استفاده در کارخانجات دیگر می تواند راهگشا باشد. به همین دلیل در این تحقیق به بررسی انواع روش های مؤثر جهت کاهش مصرف انرژی در کوره احیا مستقیم میدرکس و کوره قوس الکتریکی پرداخته شده است. به کارگیری روش های ذکر شده در هر قسمت می تواند منجر به کاهش مصرف انرژی، افزایش سرعت تولید، بهبود کیفیت فولاد و کاهش قیمت تمام شده آن شود. امید است به زودی شاهد توجه بیشتر در زمینه به کارگیری روش های ذکر شده در صنعت فولاد کشور باشیم.

از آنجایی که شاخص مصرف انرژی در صنعت فولاد ایران نسبت به شاخص کارخانجات پیشرفته و مدرن دنیا فاصله زیادی دارد، لذا برنامه ریزی و اجرای طرح های مناسب جهت کاهش مصرف انرژی در صنایع تولید فولاد و در نتیجه افزایش نرخ تولید و کاهش قیمت تمام شده فولاد، امری ضروری می باشد. خوشبختانه با توجه به تجربیات و مطالعات صورت گرفته در دنیا، جهت کاهش مصرف انرژی در صنعت فولاد ایران نیازی به ابداع روش های جدید نبوده و راهکارهای

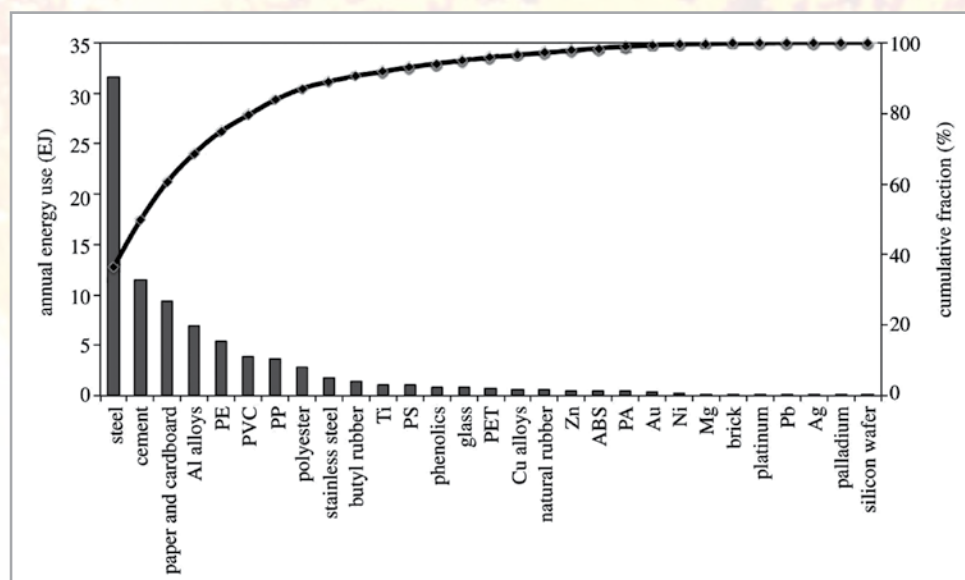


شکل ۱: مصرف نهایی انرژی جهانی در بخش‌های مختلف صنعتی برحسب نوع سوخت در سال ۲۰۱۰.

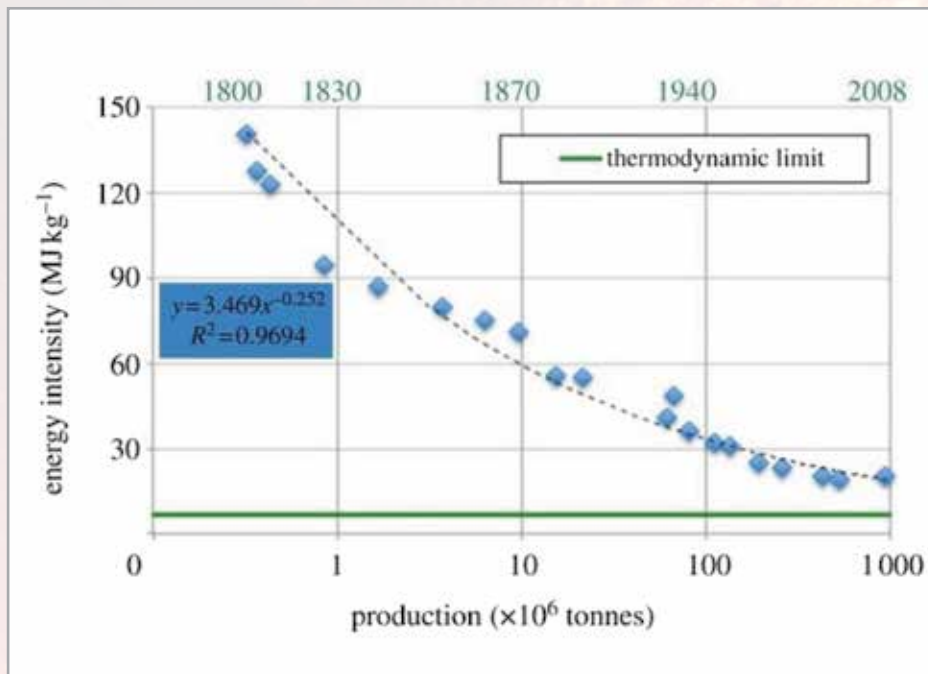
۱-مقدمه:

مصرف انرژی در جهان بوده است. تاکنون در کشور ما به علت نرخ پایین انرژی انگیزه کافی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی مخصوصاً در صنایع فولاد وجود نداشته است؛ ولی هم‌اکنون عدم توجه به این امر و افزایش قیمت تمام شده مشکلات زیادی را در راه تولید فولاد کشور ایجاد خواهد کرد. به علاوه اینکه کاهش قیمت تمام شده جهت حضور در بازارهای رقابتی جهانی، امری ضروری می‌باشد. جهت اذعان به اهمیت نقش انرژی در کاهش قیمت فولاد می‌توان بیان نمود که حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد هزینه تمام شده تولید فولاد در برخی کشورها صرف تأمین انرژی مورد نیاز می‌شود. میزان مصرف انرژی اولیه سالیانه مورد استفاده برای تولید ۲۹ ماده در شکل ۲ نشان داده شده است [۳]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سهم بالایی از انرژی، سالیانه جهت تولید فولاد استفاده می‌شود.

با توجه به روند روز افزون تولید فولاد در جهان و برنامه‌های توسعه تولید فولاد در کشور ایران (افق ۱۴۰۴)، مصرف انرژی در این صنعت روزبه‌روز افزایش می‌یابد. بر اساس برخی از تحقیقات صورت گرفته، حدود ۸-۱۲٪ انرژی تولید شده از جهان در بخش آهن و فولاد مصرف می‌شود. پیش‌بینی می‌شود مصرف انرژی در صنایع آهن و فولاد تا سال ۲۰۲۰ به حدود ۳۵٪ افزایش یابد. با این وجود با توجه به روند رو به زوال منابع طبیعی، انرژی‌های فسیلی و ذخایر گاز، بهبود فرایند و بهینه‌سازی مصرف انرژی به منظور کاهش هزینه‌ها امری بسیار مهم در صنایع تولید فولاد در جهان می‌باشد [۱، ۲]. به دلیل قیمت ارزان انرژی و یارانه دولتی تعلق گرفته به آن، میزان مصرف غیر بهینه و اتلاف آن در تمامی سطوح جامعه ایران مشاهده می‌شود. با توجه به گزارش‌های ارائه شده، میزان رشد مصرف انرژی در ایران بیش از ۵ برابر رشد



شکل ۲: انرژی اولیه مورد استفاده برای تولید ۲۹ ماده به‌صورت سالیانه در سرتاسر جهان [۳].



شکل ۳: روند تاریخی میانگین جهانی انرژی مورد نیاز برای تولید آهن خام از سنگ معدن تا سال ۲۰۰۸ میلادی [۳].

تأسیس، بیش از پیش نمود پیدا کرده است.

میزان مصرف انرژی برای تولید فولاد به عوامل مختلفی مانند روش تولید، مشخصات سنگ آهن، کیفیت زغال سنگ یا گاز طبیعی مورد استفاده، نوع محصول تولیدی و سطح فناوری بکار رفته در خط تولید، سطح اتوماسیون و دانش فنی و اقتصادی کارکنان و همچنین محدودیت‌های ایجاد شده توسط سازمان‌های حفاظت محیط زیست بستگی دارد. بنابراین روش‌های به کار رفته جهت کاهش مصرف انرژی با تمرکز بر روی تمامی مؤلفه‌های فوق بوده است. به طور مثال جایگزینی کوره‌های اکسیژن پایه به جای زیمنس-مارتین، افزایش تولید با کوره‌های قوس الکتریکی و رشد سریع ریخته‌گری پیوسته منجر به کاهش مصرف انرژی در صنعت تولید فولاد شده است. همچنین استفاده از قراضه به عنوان منابع ثانویه نسبت به سنگ آهن به عنوان منابع اولیه منجر به کاهش مصرف انرژی در تولید فولاد می‌شود؛ به نحوی که مصرف انرژی جهت تولید فولاد از سنگ آهن در کشورهای خاورمیانه تا ۳۵ درصد نسبت به تولید فولاد از قراضه در اروپا، بیشتر است. همین موضوع در کنار کاهش آلایندگی‌ها منجر به استفاده روز افزون از قراضه در کشورهای پیشرفته جهت تولید فولاد شده است. پیش‌بینی می‌شود با استفاده از تکنیک‌های مناسب بهینه‌سازی انرژی می‌توان مصرف انرژی در صنایع آهن و فولاد را به ۲۰ اگزا ژول کاهش داد [۴].

سهام تولید فولاد به روش‌های مختلف و روند تغییر آنها در بازه زمانی ۵۰ ساله جهانی در شکل ۴ نمایان می‌باشد. همانطور که مشخص است، سهم تولید فولاد به روش EAF امروزه نسبت به گذشته افزایش یافته است. سهم بزرگی از

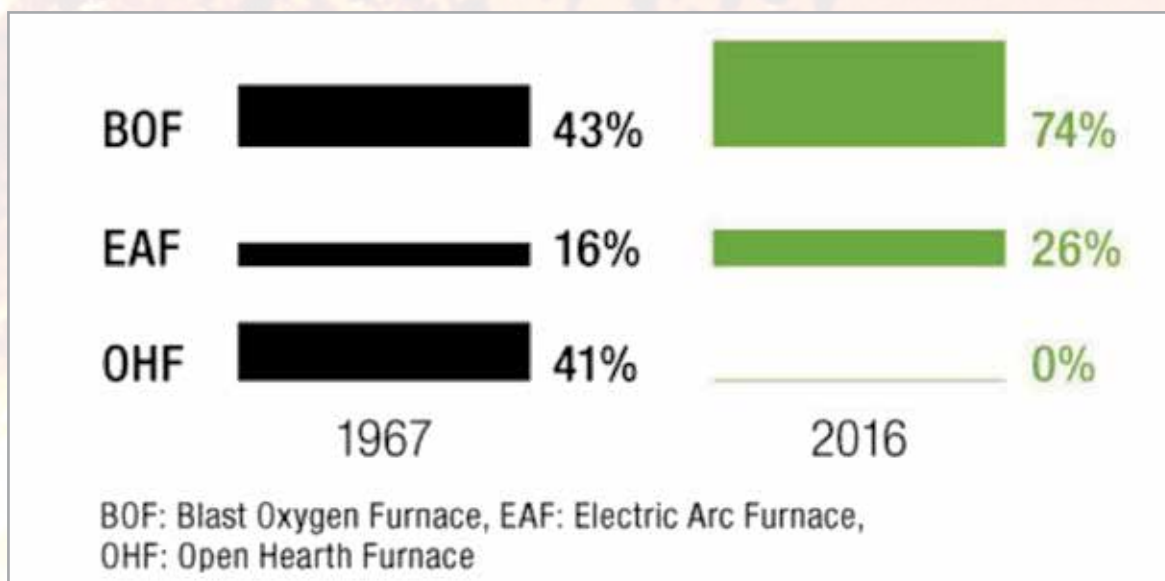
بسیاری از صنایع بزرگ فولادسازی جهان مراحل تطبیق خود با نرخ بالای انرژی را پشت سر گذاشته و هم‌اکنون در بازار رقابتی به خوبی به حیات خود ادامه می‌دهند. کشورهای صاحب فناوری در زمینه کاهش مصرف انرژی در صنایع فولاد به موفقیت‌های بارزی دست یافته‌اند؛ به گونه‌ای که میزان مصرف انرژی برای تولید یک تن فولاد طی ۳۵ سال اخیر در کشورهای آمریکا، ژاپن و اتحادیه اروپا بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته است. روند تاریخی میزان میانگین جهانی انرژی مورد نیاز برای تولید آهن خام از سنگ معدن در شکل ۳ نشان داده شده است.

با شناخت و به کارگیری راه‌حل‌های منطقی مورد استفاده در صنایع بزرگ فولادسازی جهان جهت کاهش مصرف انرژی و استفاده از تجربیات آن‌ها و بدون نیاز به ابداع روش‌های جدید می‌توان راهکارهای مطلوب را جهت اعمال در صنعت فولادسازی ایران به کار برد. با وجود مشکلات ساختاری زیاد در صنایع ایران، جهت حضور قدرتمندانه در بازارهای رقابتی نیاز است که با توجه و تمرکز بر روی راهکارهای کاهش مصرف انرژی در صنعت فولاد، بتوان این صنعت را از نظر استاندارد مصرف انرژی به سطح استانداردهای جهانی هدایت نمود. در این زمینه گام‌های مؤثر و مفیدی برداشته شده است که منجر به ایجاد شاخص‌های عملکردی خوبی شده است. با توجه به نگاه آینده محور به منابع انرژی کشور و روند صعودی تولید فولاد و نیاز به حضور فعال در بازارهای خارجی جهت رقابت با تولیدکنندگان مطرح خارجی اهمیت بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت فولاد و همچنین ایجاد زیرساخت‌های مناسب در واحدهای تولید فولاد در حال

باز یافت انرژی‌هایی است که در حال حاضر به صورت‌های مختلف از چرخه تولید به صورت تلفات خارج می‌شوند و در مرحله دوم (ولی هم‌زمان) افزایش دادن راندمان و جلوگیری از به هدر رفتن انرژی می‌باشد. هدف اصلی این مقاله بیان راهکارهای پیشنهادی با نگاهی آینده محور جهت کاهش مصرف انرژی و در نتیجه افت قیمت تولید فولاد و کاهش آلاینده و گازهای گلخانه‌ای می‌باشد.

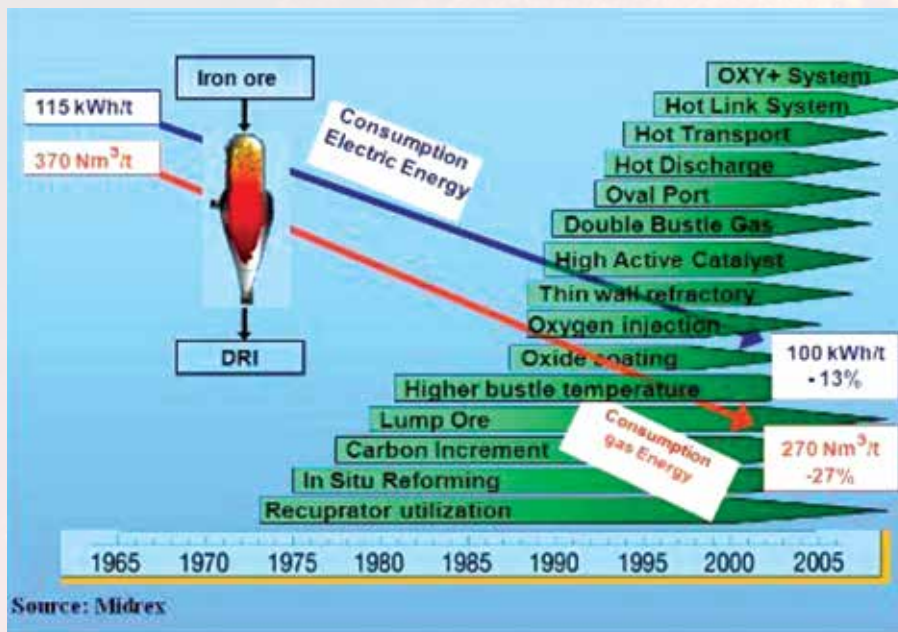
شایان توجه است که با افزایش شدید قیمت هر دو مؤلفه گاز طبیعی و انرژی الکتریکی در سال‌های اخیر، پیش‌بینی‌ها بیانگر افزایش بیش از پیش آن‌ها در آینده می‌باشد. افزایش نرخ مؤلفه‌های انرژی، آثار جانبی زیادی را علاوه بر تأثیر مستقیم آن در قیمت تمام شده فولاد خواهد داشت. پیش‌بینی‌های صورت گرفته بیانگر این است که سهم مستقیم انرژی در قیمت تمام شده فولاد به حدود ۲۰-۲۴ درصد افزایش خواهد یافت.

فولاد ایران نیز به روش قوس الکتریکی تولید می‌شود. به همین دلیل بخش بزرگی از انرژی الکتریکی کشور در حال حاضر صرف تولید فولاد در کوره‌های قوس الکتریکی نظیر صنایع فولاد مبارکه می‌شود. به همین دلیل بررسی‌های انجام شده در این تحقیق عمدتاً مربوط به انواع روش‌های پیشنهادی جهت کاهش مصرف انرژی در صنعت تولید فولاد به روش کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد. چون بالاترین میزان مصرف گاز در فرایند احیاء مستقیم (DRI) و بالاترین میزان مصرف برق در کوره قوس الکتریکی (EAF) می‌باشد، دو سرفصل اصلی این مقاله در زمینه کاهش مصرف گاز طبیعی در فرایند احیاء مستقیم میدرکس و کاهش مصرف برق در کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد. روش‌های کاهش مصرف گاز طبیعی در فرایند احیاء مستقیم و نیز انرژی الکتریکی در بخش کوره‌های قوس الکتریکی نیازمند مطالعه و برنامه‌ریزی دقیق می‌باشد. یک راه حل منطقی و نسبتاً آسان توجه به



شکل ۴: سهم روش‌های مختلف برای تولید فولاد در گذر ۵۰ ساله.





شکل ۵: نوآوری و تکنیک‌های جدید و پیشنهادی جهت کاهش مصرف انرژی (گاز طبیعی) در احیا مستقیم میدرکس.

۲- روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحد احیا مستقیم میدرکس

بهبودهای گوناگونی بر روی فرآیند میدرکس انجام شده‌اند، تا مصرف انرژی ویژه فرآیند، و فولادسازی پس از آن کاهش یابد و بهره‌وری از فرآیند میدرکس بهتر شود. این تکنیک‌ها که منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی شده‌اند، نه تنها هزینه عملیاتی را کاهش می‌دهند، بلکه مشکلات زیست‌محیطی را هم با کاهش انتشار CO_2 و سایر گازهای خروجی کمتر می‌نمایند. در این قسمت انواع روش‌های کاربردی و پیشنهادی جهت کاهش مصرف انرژی در واحدهای احیا مستقیم میدرکس بیان می‌شود. برخی از نوآوری‌ها و تکنیک‌های جدید و پیشنهادی جهت کاهش مصرف انرژی در کوره‌های میدرکس به صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است. راهکار اساسی جهت کاهش مصرف انرژی در صنعت فولادسازی با استفاده از کوره میدرکس و کوره EAF، نزدیکی این دو کوره به یکدیگر می‌باشد. در این حالا

۱-۲ سیستم بازیابی حرارت

بهره‌وری سیستم حرارتی احیا مستقیم میدرکس به میزان زیادی به سیستم بازیابی حرارتی آن بستگی دارد. در طراحی اولیه میدرکس چنین سیستمی وجود نداشت. در این سیستم حجم قابل توجهی از انرژی حرارتی گاز خروجی ریفورمر بازیابی و از آن جهت پیش گرم کردن سایر گازهای مصرفی در ریفورمر و سوخت مشعل‌ها استفاده می‌گردد. با ابداع و به کارگیری این سیستم، مصرف انرژی در واحدهای جدید میدرکس نسبت به واحدهای اولیه حدود ۲۵٪ کاهش یافت [۵].



۲-۲ تولید گاز احیایی در کوره

به دلیل خاصیت کاتالیستی آهن اسفنجی داغ، با تزریق گاز طبیعی به منطقه داغ کوره احیا و شکست آن، می‌توان گاز احیایی تولید نموده و تولید اسفنجی را افزایش داد. میزان این افزایش معادل ۷٪ تولید طراحی کوره می‌باشد.

در فرایند استاندارد میدرکس برای تولید بریکت داغ تقریباً حدود ۹۵٪ گاز احیایی از طریق ریفرمر میدرکس و ۵٪ به صورت in-situ reforming تولید می‌شود. منطقه انجام واکنش in-situ reforming در شکل ۶ نشان داده شده است. البته از آنجایی که واکنش‌های احیای گاز متان گرماگیر هستند لذا افزایش واکنش in-situ reforming منجر به افت دمایی در کوره شفت می‌شود به همین دلیل نیاز به بهینه‌سازی واکنش in-situ reforming در کوره‌های میدرکس جهت افزایش تولید و بهبود کیفیت تولیدات می‌باشد [۵].

۲-۳ افزایش کربن در آهن اسفنجی

برای کوره‌های قوس که به میزان کم و یا متوسط از آهن اسفنجی استفاده می‌کنند، کربن موجود در آهن اسفنجی در مقایسه با مواد کربن دار مشابه نظیر آنتراسیت، یک منبع کربن کاملاً اقتصادی می‌باشد. کربن موجود در آهن اسفنجی علاوه بر تامین کربن مورد نیاز مذاب، در اثر ترکیب با اکسیژن تزریقی، به افزایش بهره‌وری انرژی مصرفی کوره قوسی نیز کمک می‌نماید [۵].

۲-۴ استفاده از کلوخه سنگ آهن هماتیته

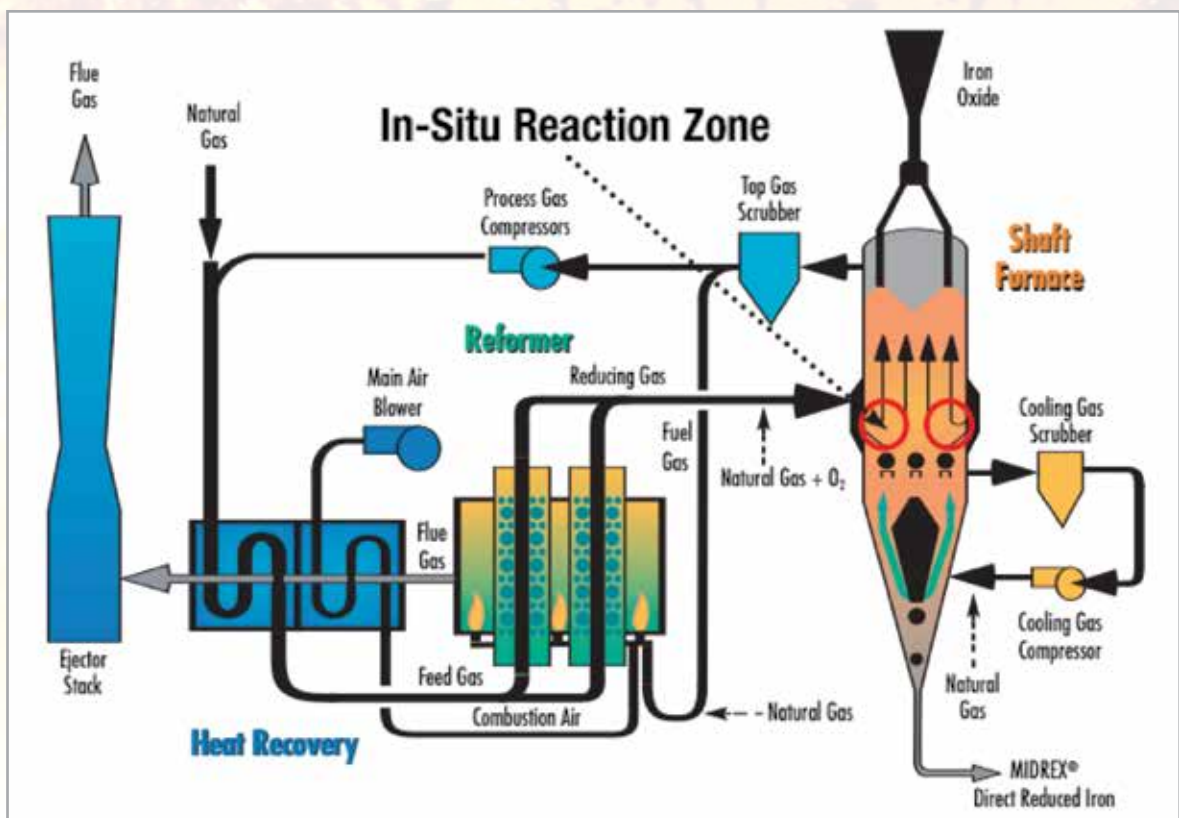
در بار کوره میدرکس

استفاده از کلوخه سنگ آهن هماتیته باعث کاهش چسبندگی گندله‌ها به یکدیگر شده و در نتیجه می‌توان درجه حرارت گاز احیایی به کوره میدرکس را تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داد که خود باعث بهبود بهره‌وری کوره احیا به میزان حدود ۱۳٪ می‌شود. قیمت کلوخه سنگ آهن از گندله ارزان‌تر می‌باشد.

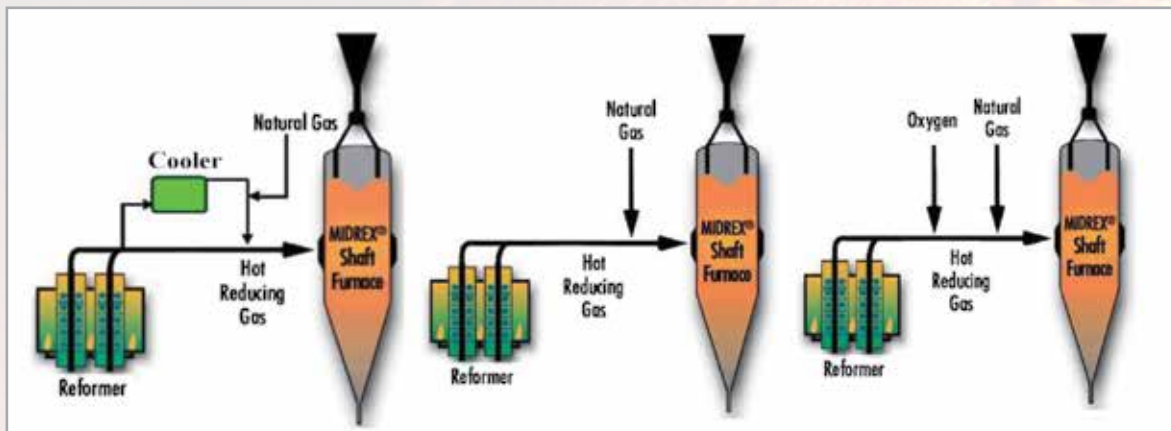
نکته مهم در اینجا این است که استفاده از کلوخه باعث افزایش میزان نرمه و ریزدانه در محصول خروجی کوره احیا می‌شود، به همین دلیل مصرف آن با محدودیت روبرو است [۵].

۲-۵ افزایش دمای گاز ورودی به کوره میدرکس

در طراحی‌های اولیه میدرکس، درجه حرارت گاز ورودی به کوره معادل ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شد. البته از همان زمان این نکته مشخص بود که افزایش حرارت گاز ورودی تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر روی بهره‌وری کوره و افزایش نرخ تولید آن و کاهش مصرف گاز دارد. میدرکس به تدریج دریافت، که هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش در درجه حرارت ورودی کوره، می‌تواند تولید کوره را معادل ۱/۵ تا ۲ درصد افزایش دهد [۵].



شکل ۶: شماتیک فرایند استاندارد میدرکس برای تولید بریکت داغ [۵].



شکل ۷: شماتیک طراحی افزایش دمای گاز ورودی به کوره احیا مستقیم توسط حذف واحد خنک کننده گاز احیایی و تزریق گاز اکسیژن [۵].

۲-۸ استفاده از کاتالیزورهای بسیار فعال

از آنجایی که واکنش ریفرمینگ ترکیبات هیدروکربنی با اکسندهایی مثل H_2O و CO_2 فرایند گرماگیر می باشد لذا رخدادهای آن نیازمند کاتالیست برای تسریع واکنش و انجام میزان درصد تبدیل مطلوب می باشد. امروزه تحقیقات زیادی جهت معرفی کاتالیست های بسیار فعال به عنوان قلب تپنده واحدهای احیا صورت می گیرد. چند مثال از کاتالیزورهای بسیار فعال شامل آلومینای ساپورت شده با نیکل به عنوان فاز فعال کاتالیست و اکسید منیزیم ناهموار همراه با مقادیر کم اکسید نیکل می باشد [۵].

۲-۹ استفاده از دو پورت برای گاز ورودی

استفاده از دو ورودی برای تزریق گاز احیایی منجر به نفوذ بهتر گاز به مرکز بار در منطقه احیا می شود، در نتیجه میزان متالیزاسیون در مرکز کوره شفت افزایش پیدا می کند. به همین دلیل امروزه اکثر کوره های میدرکس دارای دو پورت ورودی برای گاز احیا می باشند [۵].

۲-۱۰ سیستم +OXY

سیستم +OXY به منظور شکست جزئی گاز طبیعی با اکسیژن و تولید گازهای CO و H_2 ابداع شده است. همان طور که در شکل ۸ دیده می شود، +OXY علاوه بر ریفرمر از یک محفظه احتراق نیز استفاده می کند. این محفظه احتراق، گاز طبیعی و اکسیژن را به صورت ناقص می سوزاند تا هیدروژن و مونوکسید کربن تولید کند، که به گاز کاهنده (احیا کننده) که توسط ریفرمر تولید شده است اضافه گردیده و به بهره روری کوره می افزایند. قلب این سیستم، راکتور +OXY می باشد که در آن گاز طبیعی و اکسیژن مخلوط شده و در دو مرحله می سوزند. با عملکرد صحیح سیستم، تولید دوده حذف شده و گاز طبیعی به گازهای CO و H_2 تبدیل می گردد. مهم ترین موضوع برای عملکرد موفق این سیستم، دقت کافی سیستم کنترل آن می باشد. سیستم کنترل می باید میزان هر

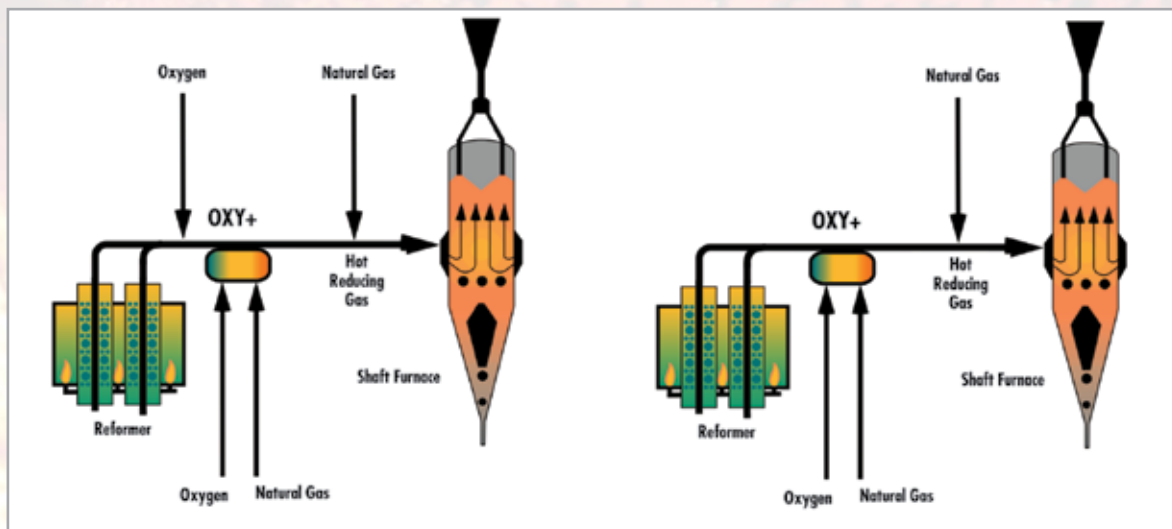
۲-۶ تجهیزات پوشش دهی گندله و تزریق اکسیژن

اگرچه افزایش درجه حرارت گاز ورودی به کوره احیا مستقیم منجر به افزایش بهره روری می شود، ولیکن افزایش درجه حرارت باعث چسبندگی گندله ها به یکدیگر و بروز مشکلات عملیاتی می گردید. با توجه به ضروریات حیاتی افزایش درجه حرارت گاز ورودی، می بایست راه حلی برای جلوگیری از چسبندگی گندله ها پیدا می شد. پس از مطالعات بسیار سرانجام مشخص شد که استفاده از سنگ آهن کلوخه و نیز پوشش دادن گندله ها با موادی نظیر آهک، سیمان و دولومیت می تواند از چسبندگی گندله ها در درجه حرارت بالاتر جلوگیری نماید. کشف این موضوع باعث شد که به تدریج تجهیزات پوشش دهی گندله به عنوان یک تجهیز استاندارد به سایر تجهیزات استاندارد واحدهای احیاء مستقیم میدرکس افزوده گردد. با افزودن این تجهیز در واحد میدرکس، درجه حرارت گاز ورودی می تواند بدون بروز هیچ مشکلی تا ۹۲۰ درجه سانتی گراد افزایش یابد. برای افزایش حرارت تا ۸۵۰ درجه سانتی گراد در مرحله اول، فقط کافی است که خنک کننده گاز احیایی از مدار خارج گردد، ولی برای تأمین درجه حرارت بالاتر تا ۹۲۰ درجه سانتی گراد، تجهیزات تزریق گاز اکسیژن به گاز ورودی را نیز بایستی به تجهیزات واحد میدرکس اضافه نمود. البته با تزریق اکسیژن، بخشی از هیدروژن و مونوکسید کربن طی احتراق با اکسیژن مصرف می شوند [۵]. موارد بیان شده در شکل ۷ به خوبی نشان داده شده است.

۲-۷ استفاده از دیواره نسوز نازک و مجرای

گاز خروجی بیضی شکل

استفاده از دیواره های نسوز نازک در منطقه احیا کوره و همچنین نصب مجرای گاز خروجی بیضی شکل منجر به کاهش افت فشار و افزایش حجم کوره می شود. به همین دلیل امروزه سعی کوره های احیا مستقیم نوین از دیواره نسوز نازک تری برخوردار هستند [۵].



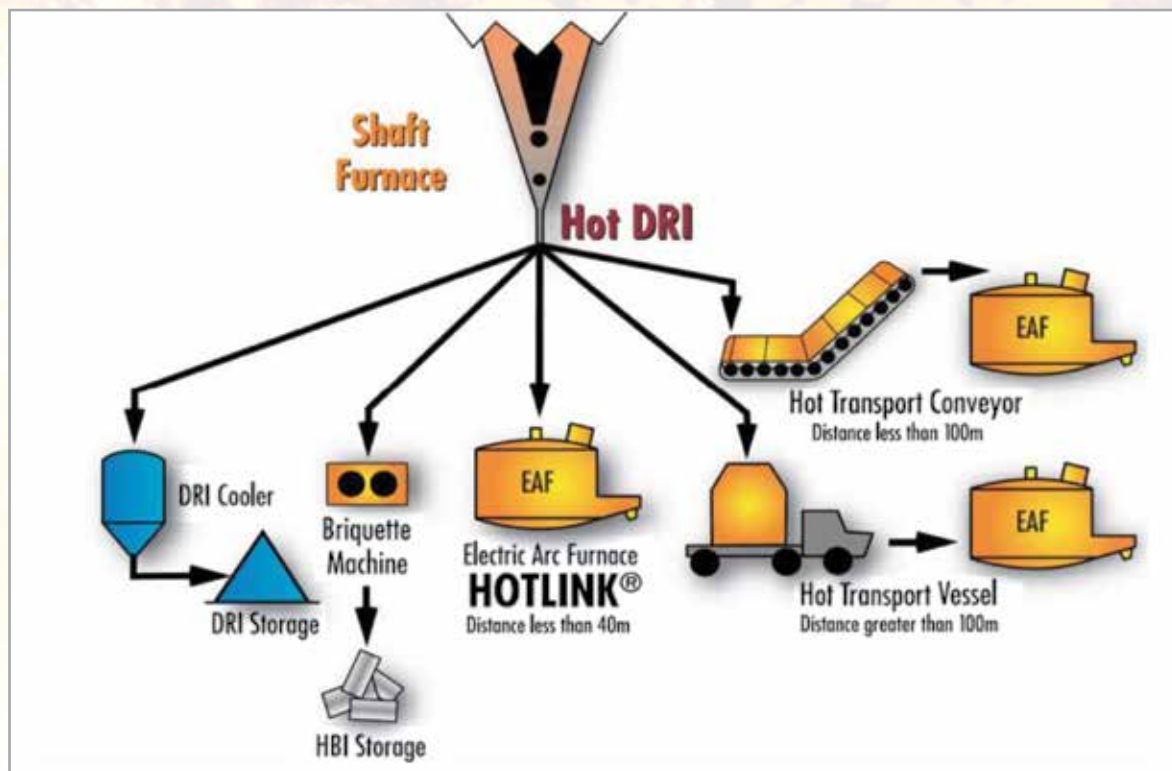
شکل ۸: شماتیک واحد احیا مستقیم میدرکس همراه با سیستم OXY+ و تزریق اکسیژن [۵].

کاهش مصرف انرژی در فرایند فولادسازی نماید [۵]. در مورد فرایند شارژ داغ آهن اسفنجی در بخش ۳ به طور کامل توضیح داده می‌شود. انواع ممکن برای شارژ داغ آهن اسفنجی تولید شده توسط فرایند میدرکس، به کوره EAF در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سه نوع فرایند انتقال شارژ داغ معرفی شده است. فرایند میدرکس معرفی شده دارای سیستم بازیابی حرارت و سیستم OXY+ می‌باشد.

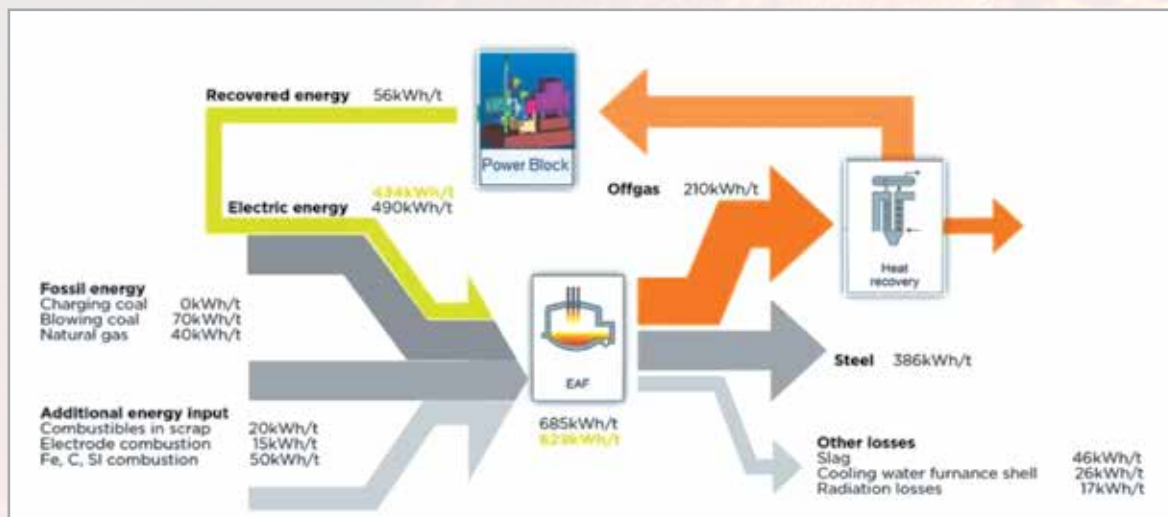
یک از گازهای طبیعی و اکسیژن را به دقت اندازه‌گیری و مخلوط نماید. در صورت عملکرد دقیق سیستم کنترل، در گاز حاصل از OXY+، حدود ۹۵٪-۹۰٪ گاز H_2 و CO خواهیم داشت. این سیستم می‌تواند تا حدود ۴٪ به تولید کوره بی‌افزاید.

۱۱-۲ سیستم شارژ داغ آهن اسفنجی

از آنجایی که محصولات تولیدی از فرایند DRI دارای بازده انرژی بسیاری زیادی هستند، استفاده از این انرژی حرارتی فوق‌العاده قبل از آزاد شدن آن می‌تواند کمک شایانی به



شکل ۹: فرایند انتقال شارژ آهن اسفنجی داغ به کوره‌های قوس الکتریکی [۶].



شکل ۱۰: انرژی‌های ورودی و خروجی در سیستم فولادسازی به روش کوره قوس الکتریکی

که حدود ۷۰٪ برق مورد استفاده در صنعت فولاد صرف کوره‌های قوس الکتریکی می‌شود.

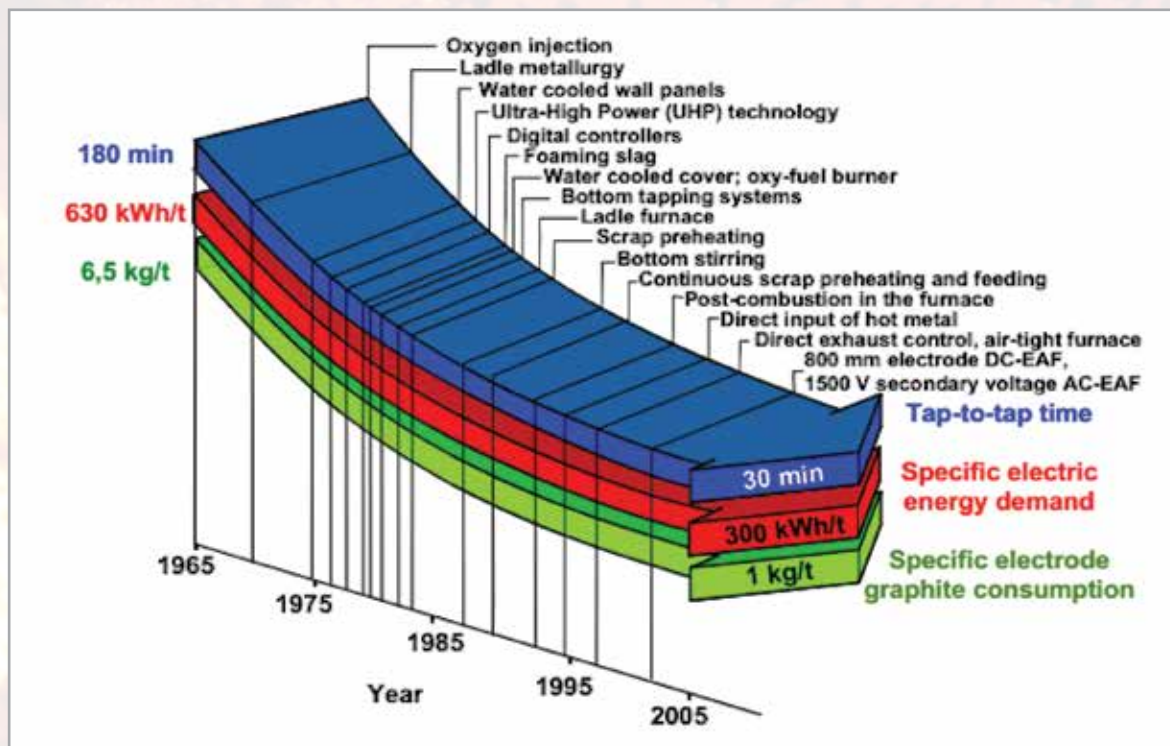
در محاسبه میزان مصرف برق کوره‌های قوس الکتریکی ترکیب شارژ، میزان بازیافت آهن، میزان مصرف مواد سرهم‌زاد، مصرف سوخت‌های کمکی، اکسیژن، درجه حرارت تخلیه، مدت زمان عبور و قطع برق از جمله عوامل مؤثر هستند [۱۸]. در سال‌های اخیر کشورهای پیشرفته در زمینه تولید فولاد جهت کاهش مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند. همچنین صنعت فولاد کشور نیز در این زمینه چندین راهکار ارائه داده است. جهت ترسیم آینده فرایند کوره EAF، برخی از نوآوری‌ها و توسعه تکنولوژی‌های ارائه شده جهت کاهش مصرف انرژی در این حوزه بر حسب زمان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که بیان شد؛ موارد ذکر شده حاصل تجربیات مختلف در کشورهای دیگر جهت افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف انرژی در صنعت فولاد می‌باشد.

۳- روش‌های کاهش انرژی در کوره‌های EAF:

از ورود کوره‌های قوس الکتریکی به صنعت فولادسازی در سال ۱۸۹۹ تاکنون، پیشرفت‌های زیادی در فناوری آن ایجاد شده است. جهت‌گیری این پیشرفت‌ها به سمت افزایش تولید، کاهش زمان ذوب، کاهش مصرف الکتروود و نسوز و کاهش هزینه تولید بوده است. انرژی در کوره قوس الکتریکی به دو طریق انرژی الکتریکی و انرژی شیمیایی تأمین می‌شود. انرژی الکتریکی به عنوان منبع اصلی تأمین انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی حدود ۶۰ درصد انرژی مورد نیاز را برآورده می‌سازد. انرژی شیمیایی نیز یا از طریق واکنش‌های متالورژیکی مانند واکنش‌های اکسیداسیون عناصر مختلف و یا واکنش‌های احتراق ثانویه طراحی شده جهت افزایش سهم انرژی شیمیایی و کاهش تلفات در تأمین گرمای لازم وارد عمل می‌شود [۱۷].

یکی از مهم‌ترین راهکارها جهت کاهش هزینه تولید و مهم‌ترین جنبه پیشرفت در کوره‌های قوس الکتریکی، کاهش مصرف انرژی الکتریکی می‌باشد. گزارش شده است





شکل ۱۱: نوآوری و تکنیک‌های جدید و پیشنهادی جهت کاهش مصرف انرژی الکتریکی در کوره قوس الکتریکی [۹].

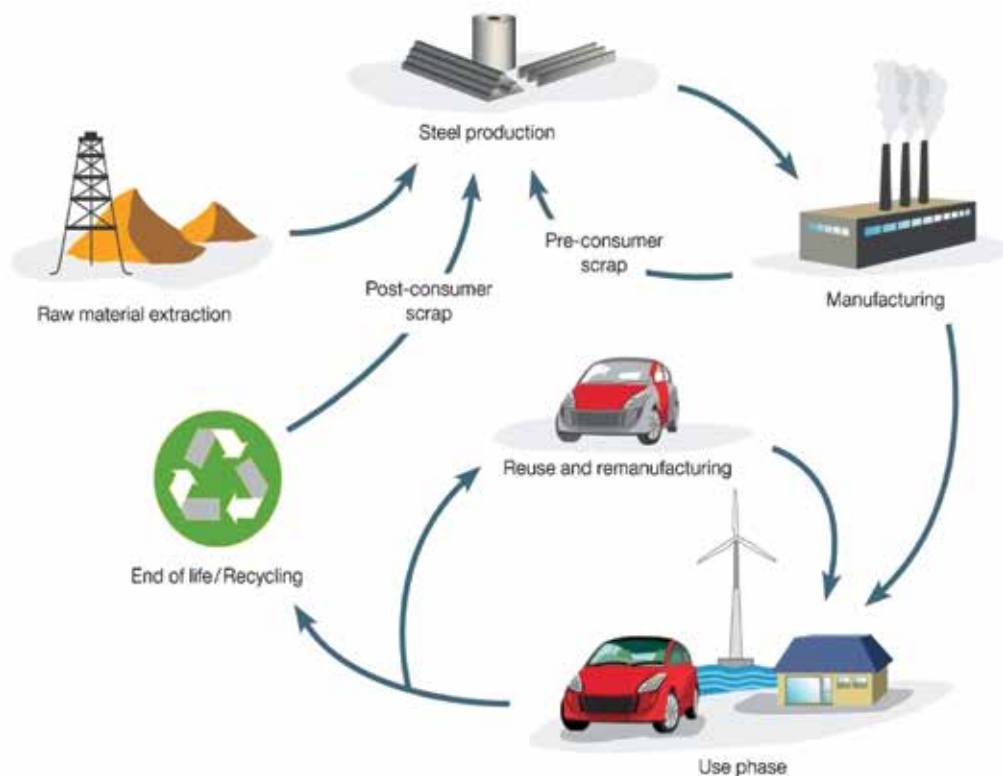
مواد اولیه می‌باشد. از آنجایی که حدود ۷۳ درصد فولاد در ایران به روش کوره قوس الکتریکی می‌شود، از آنجایی که قراضه بر خلاف آهن اسفنجی نیازی به انرژی احیا ندارد، لذا افزایش نسبت قراضه به آهن اسفنجی در کوره‌های EAF کمک شایانی به کاهش مصرف انرژی می‌کند. از طرف دیگر افزایش میزان مصرف قراضه، مشکلاتی مانند کاهش منابع طبیعی و گرمایش زمین ناشی از افزایش خروج آلاینده‌های گازی نظیر CO_2 را برطرف می‌نماید. در صورت استفاده ۱۰۰ درصدی از قراضه برای تولید فولاد، نیاز به واحدهای گندله‌سازی و احیا که بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌های انرژی در صنعت فولاد هستند، حذف می‌شود [۱۰].

در ادامه برخی از موارد کاربردی موفق جهت کاهش مصرف انرژی در کوره‌های EAF مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳-۱ افزایش نسبت قراضه به آهن اسفنجی

مقدار تولید قراضه در کشورها به عوامل گوناگونی نظیر توسعه یافتگی، جمعیت، مصرف ظاهری فولاد، میزان تولید فولاد، درآمد سرانه و شاخص رفاه، فرهنگ مصرف، ساختار بازافت کشورها، تکنولوژی تولید و نرخ بهره‌وری محصولات فولادی، ضریب انباشتگی محصولات فولادی در سال‌های قبل و... بستگی دارد. میزان قراضه مصرفی در سال ۲۰۰۹ در جهان حدود ۳۸ درصد از کل تولید فولاد بوده است. مهم‌ترین عامل ورودی تاثیرگذار بر مصرف انرژی در صنعت آهن و فولاد،

THE LIFE CYCLE OF STEEL



Source: worldsteel

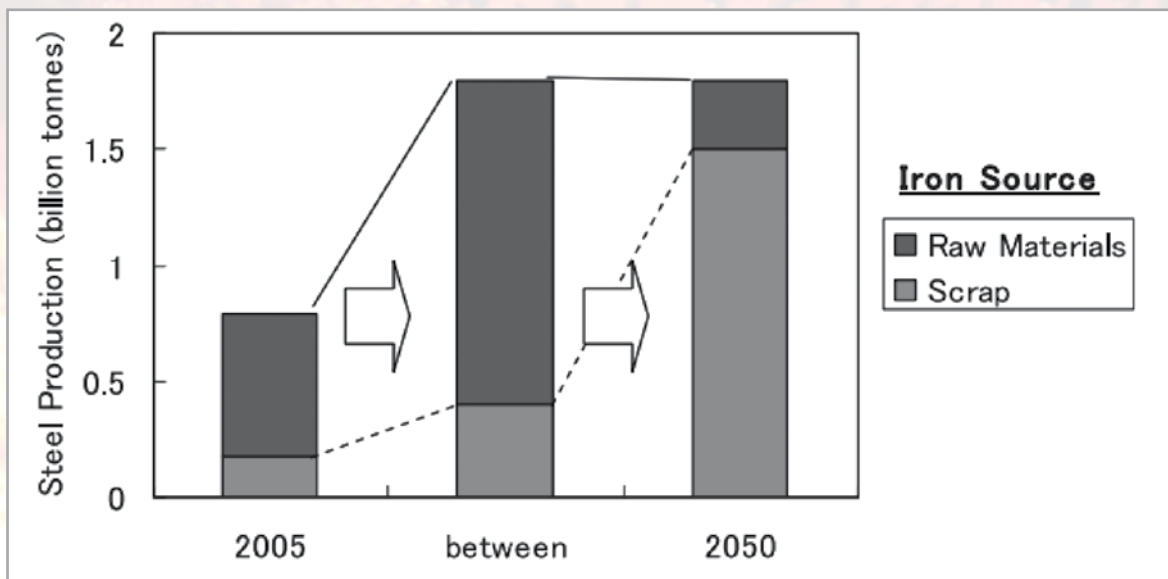
شکل ۱۲: چرخه بازگشت آهن به صنایع تولید فولاد به صورت قراضه.

قراضه منجر به کاهش مصرف انرژی شده است. مصرف قراضه در صنعت فولاد کشور سالانه حدود ۲ میلیون تن بوده که در صورت افزایش به ۵ میلیون تن، حدود ۵۶۰۰۰ تراژول صرفه جویی سالانه مصرف انرژی رخ می دهد.

به منظور بررسی تأثیر درصد استفاده از قراضه به عنوان ماده اولیه در کاهش مصرف انرژی، اطلاعات مربوط به تولیدات، مواد اولیه و مصرف انرژی در ۵ واحد بزرگ تولید کننده فولاد (با تکنولوژی های مختلف تولید) در جدول ۱ ارائه شده است. ملاحظه می شود که افزایش درصد آهن

جدول ۱. اطلاعات مربوط به تولیدات، مواد اولیه و مصرف انرژی در ۵ واحد بزرگ تولید کننده فولاد [۶].

واحد صنعتی	تکنولوژی مورد استفاده	تولید سالانه محصول (میلیون تن)	قراضه مورد استفاده (میلیون تن)	نسبت استفاده از قراضه نسبت به محصول تولیدی	مصرف ویژه انرژی به ازای یک تن محصول نورد (GJ/ton)
۱	کوره بلند-کونورتور	۲.۸	۰.۴	۰.۱۴	۲۴.۲۹
۲	احیای مستقیم با کوره-های قوس الکتریکی	۴.۳	۰.۸۸	۰.۲	۱۸.۳۸
۳	احیای مستقیم با کوره-های قوس الکتریکی	۳	۰.۱۴۳	۰.۰۴۷	۲۵.۴۶
۴	ذوب قراضه در کوره های قوس الکتریکی	۰.۲۶	۰.۲۳	۰.۸۸	۱۰.۱
۵	احیای مستقیم با کوره-های قوس الکتریکی	۰.۵۸۴	۰.۱۲	۰.۲	۱۸.۲۱



شکل ۱۳: تغییرات نسبت مواد خام و قراضه به عنوان منبع آهن برای تولید فولاد با گذر زمان [۶].

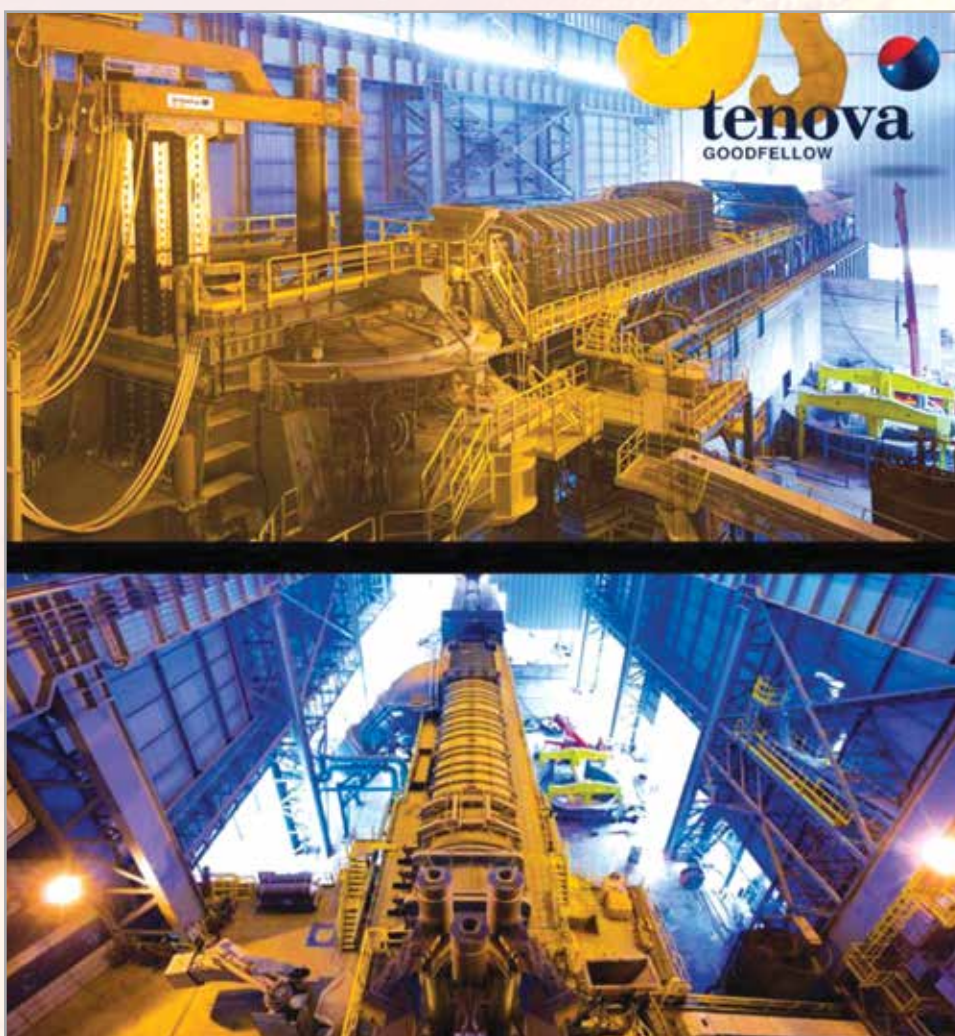
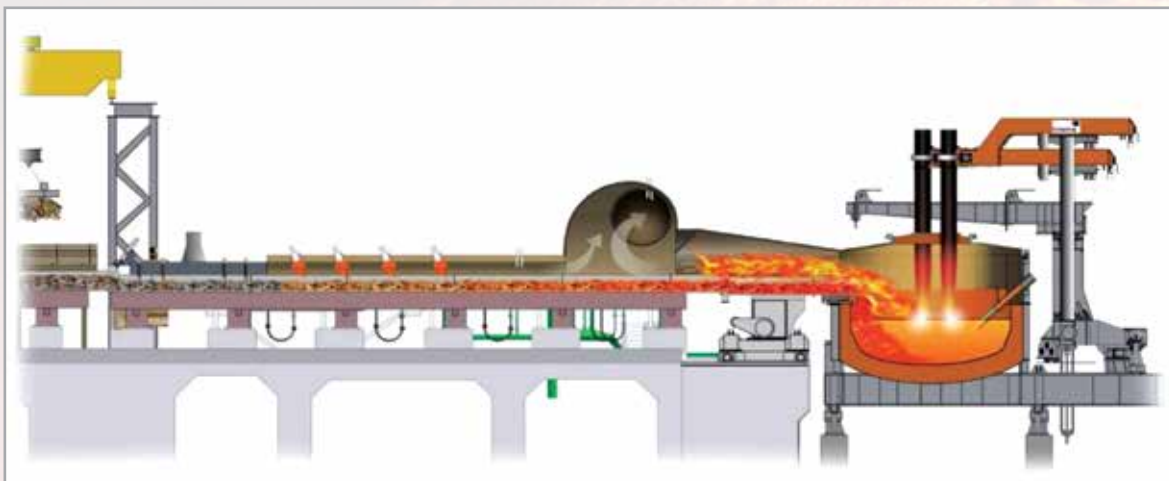
دلیل سبب کوچک‌تر ابعاد قراضه می‌تواند تعداد دفعات شارژ قراضه را کاهش دهد. بنابراین اگرچه حضور قراضه منجر به کاهش مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی می‌شود، ولیکن افزایش تعداد دفعات شارژ قراضه به علت باز شدن درب کوره منجر به افزایش مصرف انرژی می‌گردد. بیان شده است که شارژ دو سید قراضه به کوره EAF با حداکثر میزان شارژ می‌تواند منجر به افزایش بازدهی فرایند و کاهش زمان ذوب شود. به علت دلایل ذکر شده، افزایش بیشتر از دو سید توصیه نشده است. جهت کاهش سبب قراضه‌ها و افزایش دانسیته سبدهای شارژ قراضه می‌توان طراحی‌های خاصی در زمینه استفاده از دستگاه‌های برش و پرس مکانیزه انجام داد.

روند کلی در صنعت فولاد جهان، افزایش مصرف قراضه و کاهش مصرف مواد خام می‌باشد. تغییرات نسبت منبع آهن برای تولید فولاد تا سال ۲۰۵۰ در شکل ۱۳ نشان داده شده است [۶].

۳-۱-۱ اصلاح بارگیری قراضه

ابعاد قراضه‌های مصرفی در کوره‌های قوس الکتریکی تأثیر بسزایی در مصرف انرژی دارد. مشخص است که کاهش ابعاد قراضه منجر به کاهش مصرف انرژی لازم برای ذوب می‌شود. همچنین افزایش ظرفیت سبدهای تغذیه قراضه به کوره‌های قوس الکتریکی منجر به کاهش تعداد دفعات باز شدن درب کوره و در نتیجه افزایش راندمان فرایند می‌شود. به همین



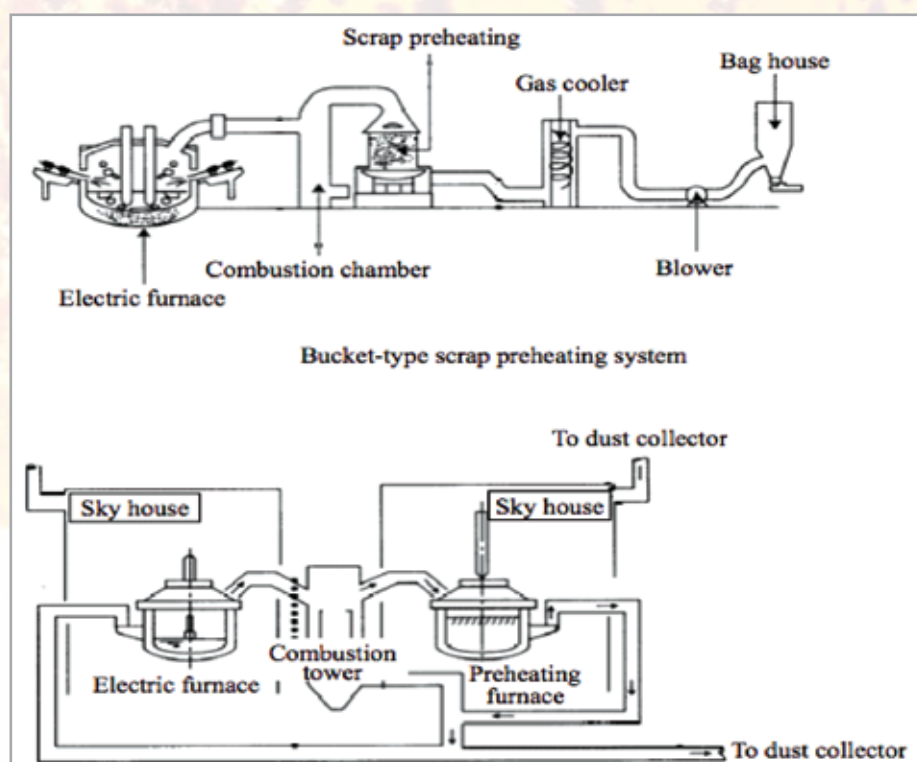
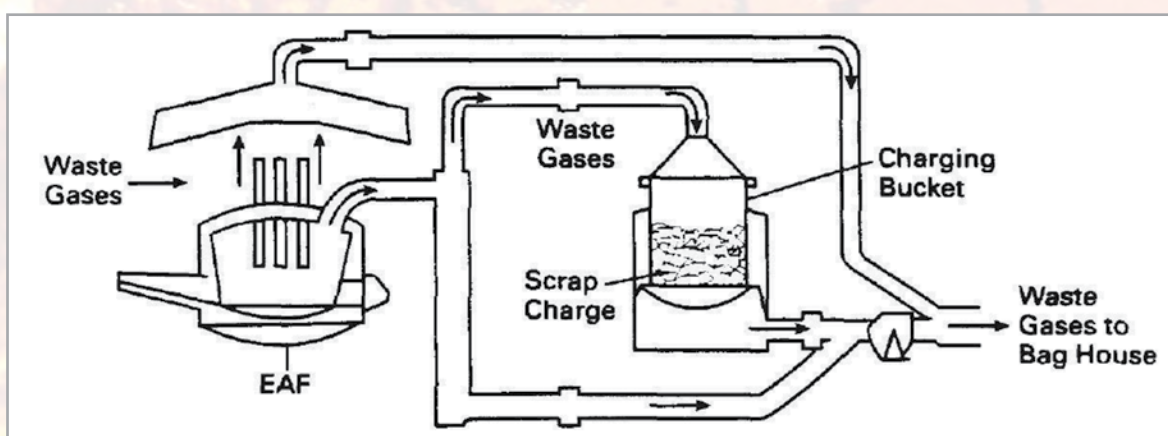
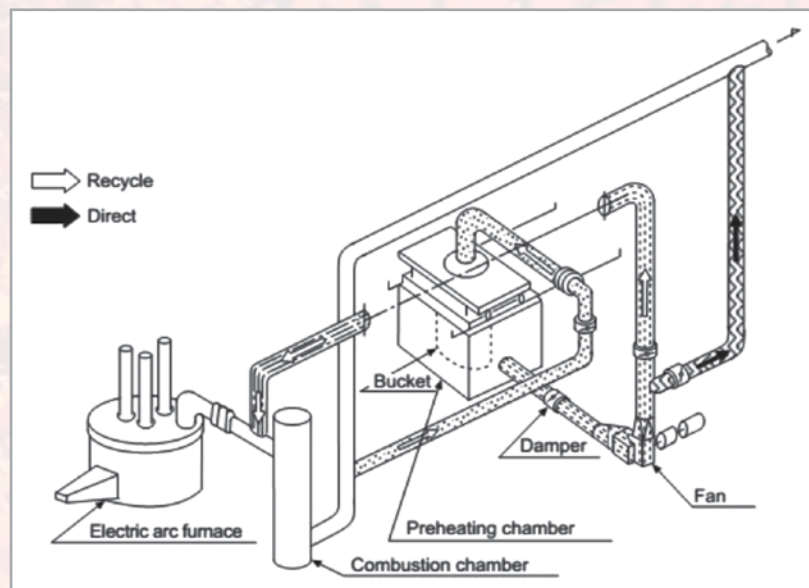


شکل ۱۴: سیستم پیش گرمایش مواد ورودی به کوره قوس الکتریکی، پیشنهاد شده توسط شرکت Tenova.

۳-۲- پیش گرمایش مواد ورودی به کوره EAF

پیش گرمایش آهن می تواند به صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی در کوره های EAF کمک نماید. با توجه به اینکه مواد مصرفی در کوره EAF شامل آهن قراضه و آهن اسفنجی می باشد؛ لذا پیش گرمایش هر دو این مواد می تواند مورد توجه قرار بگیرد.

همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، میزان انرژی مربوط به گازهای خروجی از کوره قوس الکتریکی حدود ۳۰٪ می باشد بنابراین استفاده از انرژی حرارتی گاز خروجی از کوره به عنوان منبع عظیم انرژی برای



شکل ۱۵: چند نمونه از سیستم‌های پیش گرم‌کننده قراضه [۱۱].

خروجی و افزایش سرعت ذوب، از مزایای این فرایند می‌باشد [۱۱]. شماتیک از فرایند KE-S در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

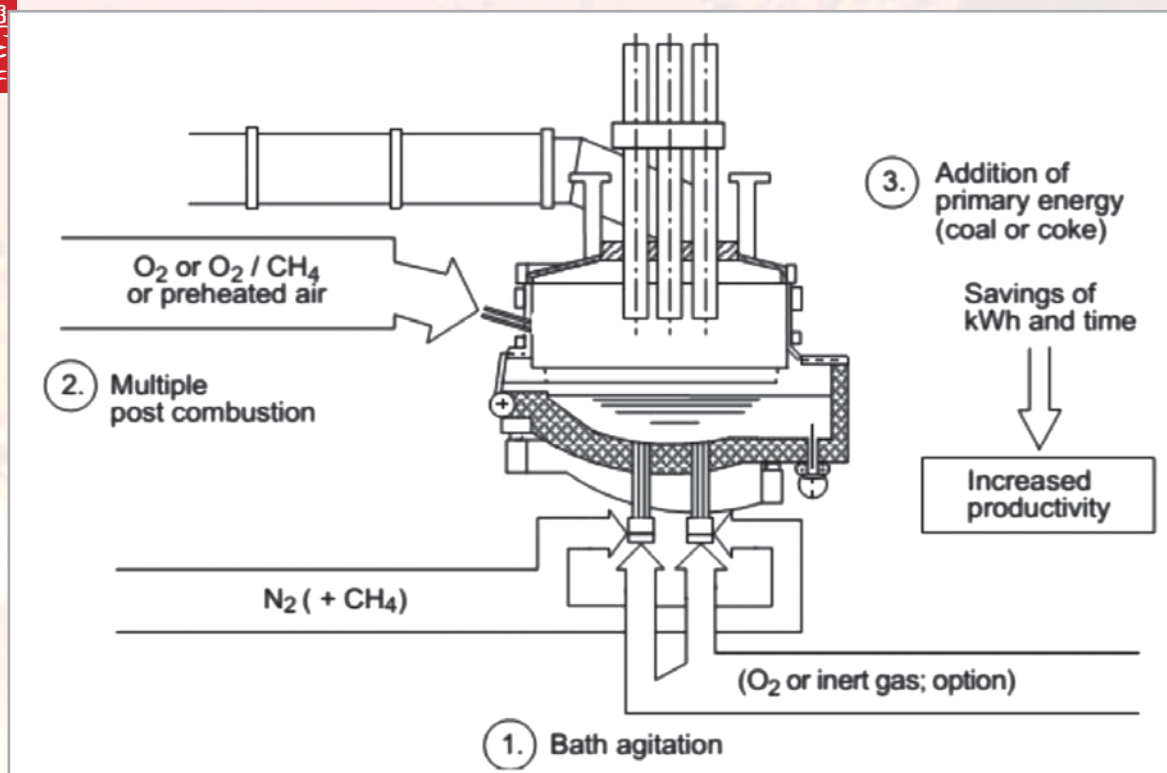
(ج) شافت پیش گرم: این شافت در کنار کوره قوس ساخته می‌شود و با گازهای خروجی و مبدل‌های حرارتی عمل می‌کند. قراضه درون شافت، توسط گازهای داغ خروجی پیش گرم می‌شود. گاز خروجی از شافت از محفظه سوخت عبور کرده تا هیدروکربن‌هایی که از قراضه وارد آن شده است، بسوزد [۱۱].

پیش‌گرمایش آهن اسفنجی نسبت به آهن‌قراضه از مشکلات و پیچیدگی‌های بیشتری برخوردار می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، افزایش دما منجر به افزایش تمایل آهن اسفنجی جهت واکنش با اکسیژن می‌شود. به همین دلیل استفاده از گازهای خنثی و ارزان قیمت نظیر نیتروژن جهت محافظت آهن اسفنجی در برابر تماس با هوا توصیه می‌شود. از آنجایی که در صنعت فولاد ایران، میزان سهم آهن اسفنجی بیشتر از سهم قراضه آهن می‌باشد؛ لذا تحقیق در زمینه پیش‌گرمایش آهن اسفنجی می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل ملاحظه انرژی الکتریکی شود. می‌توان از طرح‌های پیشنهادی در این زمینه استفاده کرد. می‌توان نیتروژن را توسط فن به درون لوله‌های فولادی و از آنجا به درون سیلوهای نگهداری آهن اسفنجی وارد نمود. لوله‌های فولادی بایستی از مسیر عبور گازهای داغ خروجی از کوره عبور کنند. در نتیجه با عبور نیتروژن از درون این لوله‌های

پیش‌گرمایش قراضه آهن مصرفی در کوره EAF منجر به حذف رطوبت، مواد فرار و هیدروکربن‌های آن نظیر پلاستیک‌ها، رنگ‌ها و روغن‌ها در خارج از کوره قوس الکتریکی می‌شود. علاوه بر موارد ذکر شده که منجر به افزایش ایمنی شرایط ذوب قراضه می‌شود، پیش‌گرمایش قراضه می‌تواند زمان لازم برای ذوب و در نتیجه مصرف انرژی را در کوره قوس الکتریکی کاهش دهد و در نتیجه میزان گردوغبار خروجی از کوره نیز کاهش می‌یابد. به دلیل شرایط زنبیل‌های تغذیه قراضه آهن، معمولاً پیش گرم بیشتر از ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد توصیه نمی‌شود. فرایندهای پیش گرم قراضه عبارت‌اند از:

الف) فرایند کوره بهینه کننده انرژی: در این حالت از گاز خروجی از بالای کوره جهت گرم کردن قراضه استفاده می‌شود [۱۱]. چند نمونه شماتیک از سیستم‌های پیش گرم کننده قراضه در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

ب) فرایند KE-S: در این فرایند از سه تزریق کننده زغال سنگ در کوره استفاده می‌شود. اکسیژن جهت واکنش با زغال و تولید گاز CO به حمام تزریق شده و سپس به CO₂ تبدیل می‌شود. حرارت بسیار بالای ایجاد شده در اثر واکنش‌های مذکور به سمت حمام منتقل می‌گردد. از طرف دیگر همزده شدن شدید حمام مذاب توسط توپ‌های غوطه‌ور، منجر به بهبود فرایندهای متالورژیکی می‌شود. جایگزینی انرژی الکتریکی با انرژی سوخت زغال سنگ و سوخت گازها در کوره با فرایند سوزاندن چندمرحله‌ای گاز



شکل ۱۶: شماتیک فرایند KE-S [۱۱]

فولادی، می‌توان گرمای زیادی را به سیلوهای نگهداری آهن اسفنجی منتقل نمود. میزان مصرف نیتروژن در این حالت زیاد بوده و می‌توان در طرح‌های پیشرفته‌تر نیتروژن خروجی از سیلو را دوباره جمع‌آوری و پس از فیلتر کردن، استفاده نمود.

تأثیر پیش‌گرمایش آهن بر کارایی کوره قوس الکتریکی با استفاده آنالیز اکسرژی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی آنالیز انرژی و اکسرژی و محاسبه ترم‌های انرژی و اکسرژی مواد ورودی و خروجی کوره‌های قوس ۱۷۰ تنی یک واحد فولادسازی نشان می‌دهد که حدود ۷۳ انرژی ورودی به کوره از طریق انرژی الکتریکی و حدود ۱۸ درصد از طریق انرژی شیمیایی بوده است. همچنین انرژی خروجی مربوط به فولاد مذاب حدود ۴۲ درصد بوده و سهم گازهای خروجی حدود ۱۸ درصد بوده است.

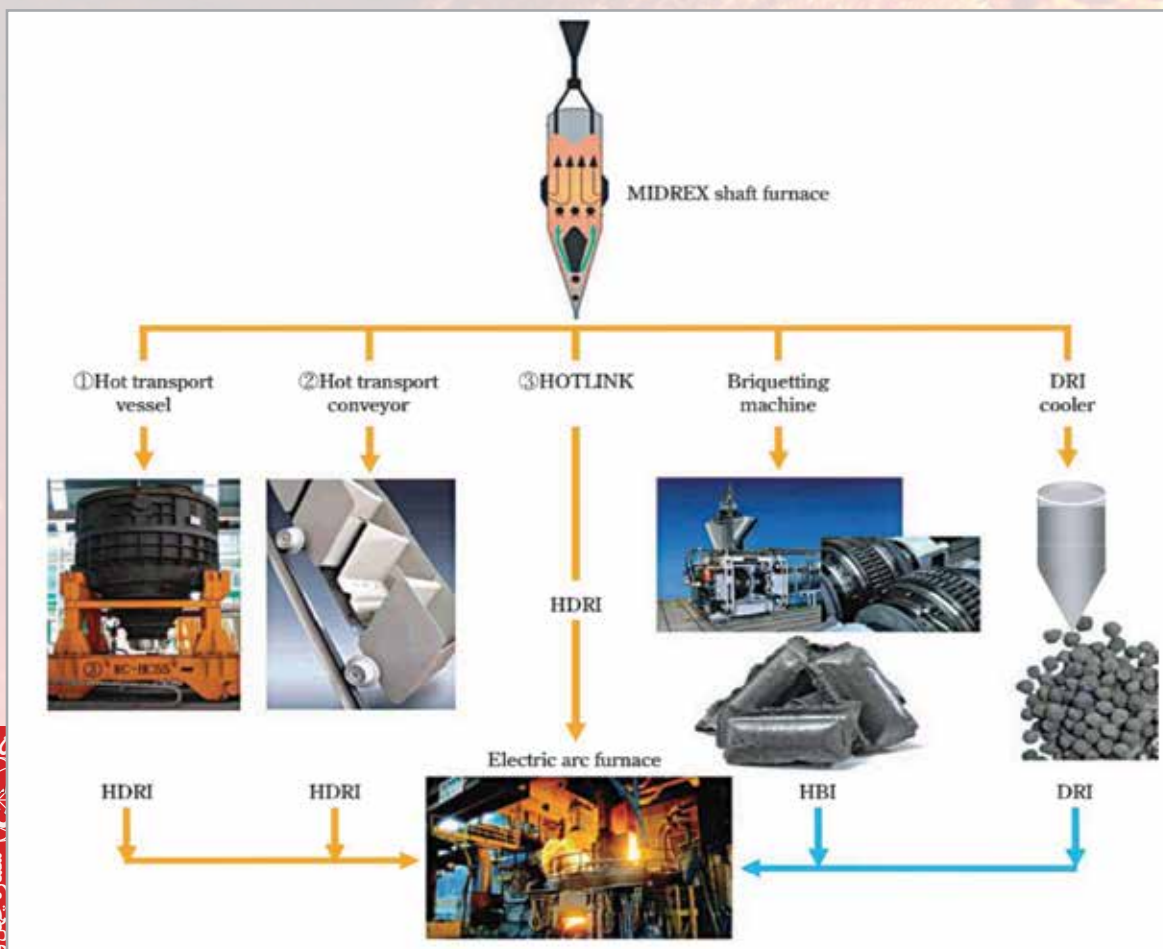
نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که از بین مواد خروجی از کوره قوس الکتریکی، گازهای داغ خروجی از کوره پس از فولاد مذاب بیشترین مقدار انرژی و اکسرژی (۱۳٪) را به همراه خود از سیستم به بیرون منتقل می‌کنند. شایان توجه است که اکسرژی اتلافی حدود ۵۰ درصد بوده است. نتایج بررسی‌های صورت گرفته بیانگر افزایش میزان انرژی بازیاب شده با افزایش دمای پیش گرم آهن اسفنجی و قراضه پیش گرم شده می‌باشد. از آنجایی که مطابق صنعت فولاد ایران، میزان تناژ آهن اسفنجی به کوره‌ها بیشتر از آهن قراضه بوده است، پیش‌گرمایش آهن اسفنجی موجب بازیاب انرژی الکتریکی به میزان بیشتری شده است. راندمان انرژی

و اکسرژی کوره‌ها در صورت پیش‌گرمایش آهن اسفنجی تا دمای ۷۸۰ کلوین به ترتیب ۳/۱۵ درصد و ۲/۲۵ درصد افزایش یافته است.

نکته دیگری که می‌تواند با پیش‌گرمایش مواد ورودی به کوره‌های قوس الکتریکی مورد توجه قرار بگیرد؛ کاهش زمان ذوب تا ذوب می‌باشد. نتایج بدست آمده بیانگر کاهش ۱۳/۵ درصدی زمان ذوب در صورت پیش‌گرمایش مواد ورودی تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

راهکار دیگری که در این زمینه توصیه شده است، فرایند شارژ داغ (Hot Link) می‌باشد. فولاد اسار (Essarr) در هند و شدید (Shadeed) عمان در این زمینه پیش‌تاز می‌باشند. در روش Hot Link، شارژ آهن اسفنجی داغ (HDRI) مستقیماً با استفاده از نیروی جاذبه توسط یک دستگاه آب بندی شده از کوره احیا مستقیم به کوره قوس الکتریک منتقل می‌شود. در این حالت، کوره احیا در کنار دیوار کوره قوس الکتریکی نصب شده و خروجی میدرکس به‌صورت کاملاً داغ مستقیماً به مخزن ذخیره آهن اسفنجی در بالای کوره EAF حمل می‌شود. البته برای مواقعی که آهن اسفنجی داغ مستقیماً مصرف نمی‌گردد، سیستم جداگانه‌ای به‌صورت موازی جهت خنک کردن آهن اسفنجی داغ در نظر گرفته شده است. دمای HDRI خروجی از کوره احیا مستقیم بین ۶۵۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و افت دمایی در حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد در طول مسیر تا کوره EAF ایجاد می‌شود. در حالی که در سیستم پنوماتیک انتقال شارژ، دما از ۷۰۰ به ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد [۵، ۱۲].





شکل ۱۷: روش‌های انتقال از کوره میدرکس به کوره قوس الکتریکی [۵].

سه روش مربوط به انتقال شارژ گرم از کوره میدرکس شامل انتقال و تأمین با یک محفظه انتقال گرم، انتقال و تأمین با یک کانوایر انتقال داغ و یا استفاده از روش Hot Link در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همچنین روش‌های تخلیه HDRI مورد استفاده در کارخانجات مهم به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: روش‌های تخلیه HDRI از کوره میدرکس به کوره قوس الکتریکی در کارخانجات مهم [۵].

PLANT	LOCATION	START-UP	TYPE SYSTEM
Essar steel Module-I, II, III, IV	India	1999~2004	Hot transport vessel
HADEED Module-E	Saudi Arabia	2007	Hot transport conveyor
LION	Malaysia	2008	Hot transport vessel
ESISCO	Egypt	2010	HOTLINK
SHADEED	Oman	2010	HOTLINK

صنعت فولاد ایران افزایش میزان تولید در سال‌های آینده می‌باشد؛ استفاده از شارژ داغ مواد ورودی به کوره می‌تواند در افزایش نرخ تولید و کاهش قیمت تمام شده فولاد نقش بسزایی داشته باشد.

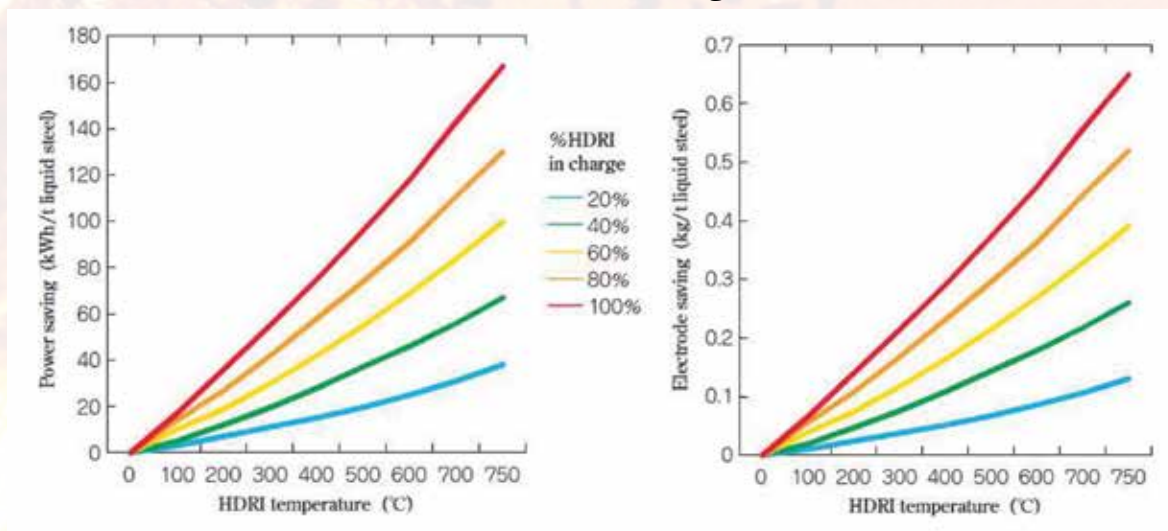
۳-۳ سرباره یفکی:

استفاده از امولسیون گاز-سرباره-مذاب (پفکی کردن سرباره) مفیدترین و اقتصادی ترین عامل کاهش انرژی در کوره های EAF است. زیرا در مقایسه با سایر روش ها به تجهیزات کمتری نیاز دارد. ایجاد سرباره پفکی در کوره های قوس الکتریکی منجر به کاهش مصرف انرژی الکتریکی، کاهش مصرف الکترود و نسوز، کاهش میزان اکسید آهن موجود در سرباره و در نتیجه راندمان تولید بالاتر می شود.

نتایج بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که افزایش میزان درصد شارژ HDRI و افزایش دمای شارژ داغ منجر به افزایش صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در کوره EAF و کاهش میزان مصرف الکترود می‌شود. این موضوع در شکل ۱۸ به خوبی نشان داده شده است. همچنین اضافه کردن مذاب چدن نیز به کوره قوس الکتریکی منجر به کاهش مصرف انرژی در تولید فولاد می‌شود. علاوه بر گرمای حاصله از چدن مذاب، حرارت حاصل از اکسیداسیون سیلیسیم، منگنز و کربن نیز باعث کاهش میزان مصرف انرژی الکتریکی می‌شود.

کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش زمان ذوب تا ذوب و کاهش قیمت تولید از مزایای دیگر استفاده از شارژ HDRI جهت تولید فولاد می باشد. با توجه به اینکه هدف

شکل ۱۸: صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی و مصرف الکترون در کوره‌های قوس الکتریکی با استفاده از شارژ HDRI [۵].



ارتفاع سرباره منجر به کاهش مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی می‌شود. همچنین بیان شده است که با کاهش میزان اکسید آهن در سرباره، ارتفاع آن افزایش می‌یابد افزایش اکسید آهن در سرباره باعث کاهش ویسکوزیته و افزایش کشش سطح و دانسیته و در نتیجه کاهش میزان پفکی شدن می‌شود. در مورد بازیسیته سرباره و نقش آن در مصرف انرژی الکتریکی بایستی به این نکته توجه نمود که افزایش بازیسیته منجر به کاهش ویسکوزیته و افت پفکی شدن می‌شود که خود منجر به افزایش مصرف انرژی در کوره‌های EAF می‌گردد. از طرف دیگر کاهش بیش از حد بازیسیته منجر به حضور ذرات فاز دوم در سرباره و افزایش مصرف انرژی می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده میزان اکسید آهن برای ایجاد سرباره پفکی و همچنین بازیسیته سرباره بایستی در حد مناسب و بهینه انتخاب شود. ایجاد سرباره‌های پفکی باعث کاهش نوسانات جریان الکترودها و افزایش توان ورودی به کوره می‌شود [۱۴-۱۶].

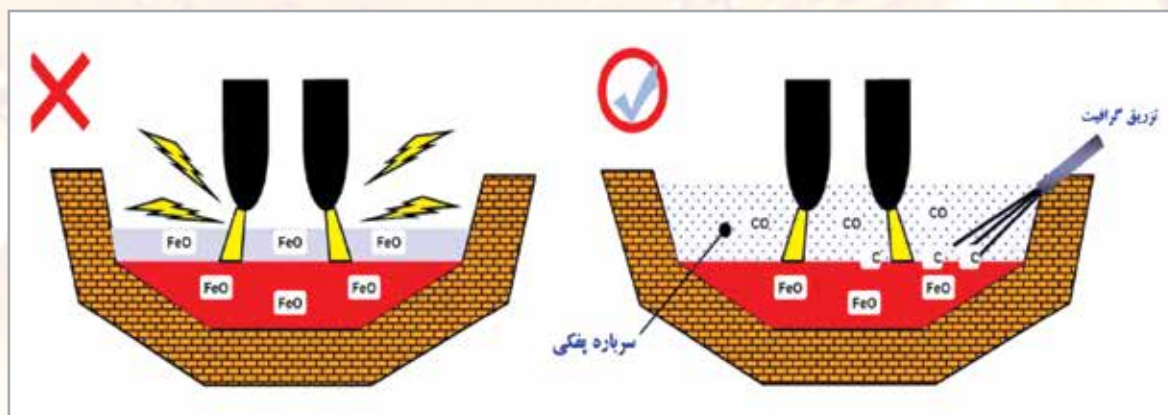
۴-۳ استفاده از لاستیک‌های فرسوده به عنوان جایگزین انرژی و کربن

۱۰ الی ۱۵ درصد وزن لاستیک‌ها را فولاد پرکریستال تشکیل می‌دهد و از طرف دیگر آنالیز شیمیایی قسمت غیرفلزی لاستیک‌ها نشانگر آن است که ترکیب لاستیک شبیه زغال و کک می‌باشد. استفاده از لاستیک‌های فرسوده در کوره‌های سیمان و نیروگاه‌های حرارتی امری متداول می‌باشد. بررسی‌های صورت گرفته در برخی از صنایع فولادسازی جهان نظیر شرکت نوکر آمریکا، ایپسکو، گرداو، تیمکن و فیرکرسن نشان داد که در فرایند فولادسازی، لاستیک‌ها می‌تواند جایگزین سوخت‌های کمکی نظیر کک، زغال، گاز طبیعی و غیره باشد و در پیش گرم کردن شارژ فلزی و تکلیس سنگ‌آهک مؤثر واقع شود. همچنین قسمت فولادی لاستیک نیز می‌تواند به‌عنوان قراضه درجه یک و تمیز در شارژ کوره مورد استفاده قرار گیرد. میزان مصرف لاستیک‌های فرسوده در صنایع فولادسازی جهان روزبه‌روز

همچنین ایجاد سرباره پفکی دارای مزایای دیگری نظیر کاهش سرباره تولیدی، حفاظت از پانل‌های کوره، بهبود انتقال حرارت، کاهش سطح نیتروژن فولاد، کاهش زمان ذوب و امکان افزایش طول قوس بدون درجه حرارت تلف شده می‌باشد. همچنین افزایش توان ترانسفورمر کوره باعث آسیب‌پذیری بیشتر نسوز دیوار کوره می‌گردد. در این حالت، بهترین و مهم‌ترین راهکار جلوگیری از آسیب‌پذیری دیوار کوره تولید سرباره پفکی می‌باشد.

نیروی محرکه پفکی شدن سرباره، انرژی حباب‌های CO است که در طول ذوب و تصفیه از واکنش‌های کربن محلول در فولاد با FeO موجود در سرباره، کربن محلول در مذاب اکسیژن تزریقی درون کوره و کربن تزریق شده در کوره با FeO موجود در سرباره ایجاد شده است. نفوذ مولکول‌های FeO در لایه سرباره را می‌توان کنترل کننده سینتیک واکنش‌های تشکیل CO در کوره‌های قوس الکتریک دانست. پس از تشکیل حباب‌های CO، این حباب‌ها از محل تشکیل خود جدا شده، در لایه سرباره به سمت بالا حرکت کرده و زیر لایه سرباره تجمع می‌یابند. سپس با پیوستن حباب‌ها به یکدیگر، فیلم سرباره پاره شده و حباب‌ها خارج می‌شوند. مجموعه این فرآیند باعث پفکی شدن سرباره می‌شود. جهت ایجاد سرباره پفکی و حفظ یک ضخامت پفکی برای پوشاندن کامل قوس می‌توان از تجهیزات جدید دم‌ش هم‌زمان اکسیژن و پودر کربن استفاده نمود. در چنین حالتی انتقال گرما از قوس به مذاب افزایش می‌یابد [۱۰، ۱۳]. شماتیک ایجاد سرباره پفکی و پوشاندن قوس الکتریکی در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که با افزایش ویسکوزیته و کاهش دانسیته و کشش سطحی سرباره، پفکی شدن بهبود می‌یابد. آنچه در سرباره‌ها بر ویسکوزیته، دانسیته و کشش سطحی تأثیر می‌گذارد، بازیسیته و درصد FeO و MgO موجود در سرباره بوده که وابسته به شارژ بکار رفته در کوره، زاویه دم‌ش، عمق دم‌ش، ماده کربنی تزریقی در کوره، توان ترانسفورماتور و تنظیمات الکتریکی کوره است. افزایش



شکل ۱۹: شماتیک ایجاد سرباره پفکی و پوشاندن قوس الکتریکی.



شکل ۲۰: مواد حاصله از پیرولیز لاستیک‌های فرسوده.

فناوری ابداع در کوره‌های قوس الکتریکی موجود کشور نزدیک به ۱۱ میلیون حلقه لاستیک فرسوده (معادل ۱۱۰ هزار تن) قابل مصرف است.

۳-۵ الکتروود

استفاده از الکترودهای گرافیتی مصنوعی در فرایندهای EAF به‌صورت استاندارد و متداول می‌باشد. مواد اولیه مورد استفاده برای تهیه الکتروود گرافیتی شامل کک نفت و قیر زغال سنگ می‌باشد. این دو ماده با یکدیگر مخلوط شده و طی چندین مرحله فرایند در دمای بالا، الکتروود بدست می‌آید. مراحل پیشرفت تکنولوژی تولید الکتروود در جدول ۳ نشان داده شده است. استفاده از الکترودهای خنک شونده با آب توسط Nippon و بسیاری از کارخانه‌های دیگر به دلیل کاهش مصرف الکتروود مورد اقبال واقع شده است. همچنین در کوره‌های DC بزرگ با تنها یک الکتروود، استفاده از الکترودهای بسیار بزرگ الزامی می‌باشد.

در حال افزایش می‌باشد. با توجه به حجم بالای حلقه‌های لاستیک در کشور می‌توان از این مزیت جهت کاهش مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی استفاده نمود. به طور کلی می‌توان بیان نمود که استفاده از لاستیک‌های فرسوده باعث جایگزینی سوخت‌های کمکی، ورود قسمت فلزی لاستیک به فولاد، کوتاه کردن مدت زمان ذوب و نفوذ کربن به فولاد می‌شود. میزان مصرف انرژی برق در کوره‌های EAF به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در صورت استفاده از لاستیک‌های فرسوده، کک از فرایند فولادسازی حذف شده و در نتیجه نیاز به مصرف مواد سربراره را نیز کمتر می‌شود. زمان افزودن لاستیک‌ها به کوره و محل قرارگیری آن‌ها بر روی بازده آن‌ها جهت کاهش مصرف انرژی تأثیرگذار می‌باشد. به طور مثال گزارش شده است که افزودن حلقه‌های لاستیک فرسوده بعد از ذوب شدن شارژ کوره و در سطح مذاب به دلیل شناور شدن لاستیک و هدر رفتن انرژی حاصل از سوختن آن از طریق دودکش، تأثیر مطلوبی جهت کاهش مصرف انرژی ندارد [۱۷-۱۹]. در صورت اجرای

جدول ۳: مراحل مربوط به توسعه و پیشرفت الکترودهای گرافیتی مصنوعی.

1898	Invention of amorphous carbon electrodes for the Hérault EAF
1900	Acheson furnace for electrode graphitization
1931	Introduction of connection nipple
1963	Massive use of conical connection nipple
1963	Massive use of impregnation with coal tar pitch
1980	Massive use of needle coke for electrode production
1990	Massive use of digital electrode regulation systems
1990	Introduction of robot for automatic joining of electrodes
1998	Patenting of electrode cooling with water ring
2004	First commercial use of electrodes with male-female union
2009	Patenting of the use of carbon fibers for electrode reinforcement

۳-۵-۱ انتخاب سطح مقطع مناسب الکتروود

در اهمیت تعیین قطر الکتروود می‌توان اظهار داشت که حدود ۸٪ انرژی در الکتروودها مصرف می‌شود. به همین جهت با استفاده از قطرهای بزرگ‌تر، تلفات الکتریکی را کاهش می‌دهند؛ ولی خود موجب افزایش تلفات حرارتی می‌شود. زیرا با افزایش مقطع الکتروود حرارت بیشتری از این طریق به خارج کوره هدایت شده و از طرفی با افزایش حجم الکتروود، گرمای بیشتری را در خود ذخیره کرده که با بالا کشیدن الکتروودها به‌صورت تشعشعی به محیط خارج انتقال می‌یابد. بنابراین طراحی بهینه الکتروود نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی دارد [۱۰].

۳-۶ توجه به آنتالپی واکنش‌های درون کوره (تزریق اکسیژن و کربن)

از ابتدای استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی همواره سعی بر آن بوده است که با به‌کارگیری انرژی حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی و واکنش‌های شیمیایی مربوط به عناصر و جایگزینی آن‌ها بجای انرژی الکتریکی، مصرف برق در این کوره‌ها به حداقل برسد. گرمای آزاد شده از واکنش‌های گرمازای رخ داده در کوره قوس الکتریکی می‌تواند جایگزین قسمتی از انرژی الکتریکی مصرفی در کوره و در نتیجه کاهش مصرف انرژی الکتریکی شود. در میان انواع واکنش‌های رخ داده در کوره EAF، واکنش کربن و اکسیژن بالاترین میزان گرما را آزاد می‌نماید. آنتالپی واکنش عناصر مختلف در واکنش با اکسیژن در جدول ۴ ارائه شده است.

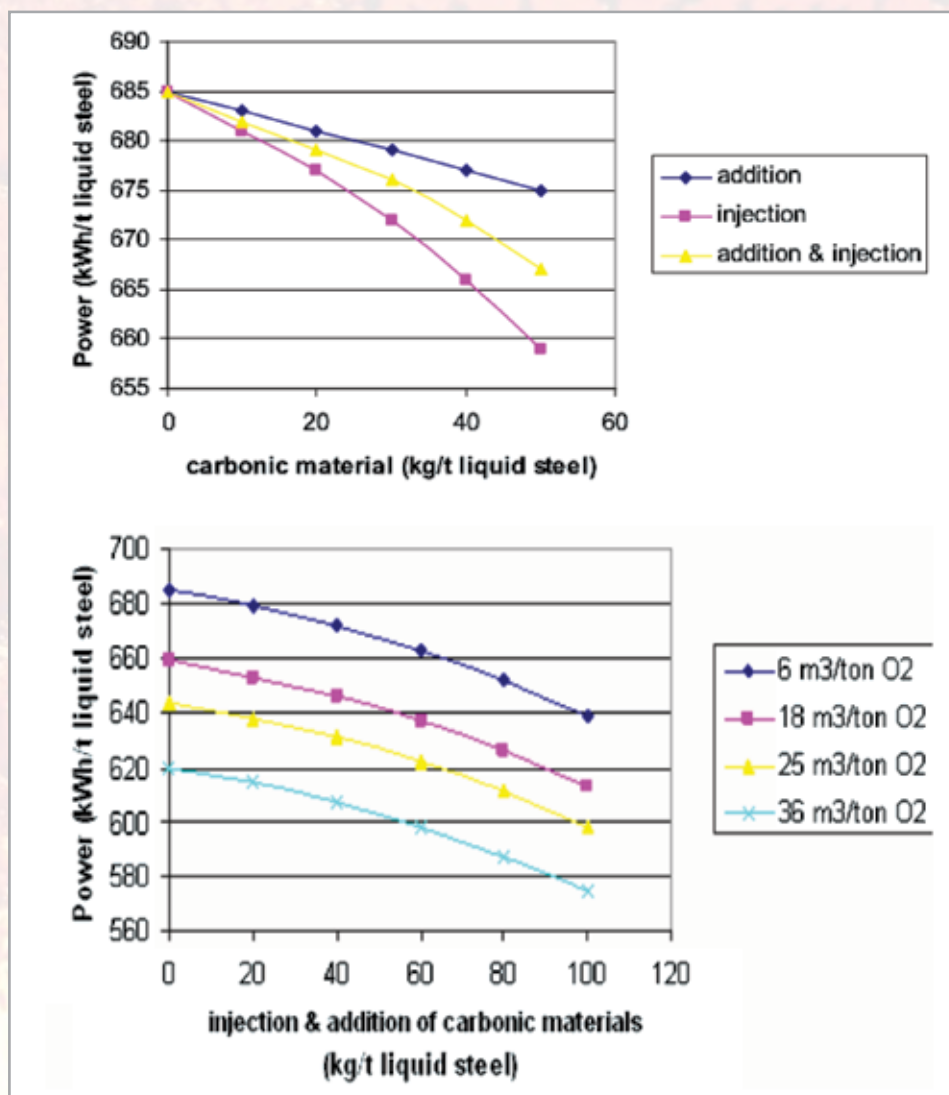
در ابتدا از اکسیژن تنها به منظور کربن‌زدایی مذاب استفاده می‌شد ولیکن امروزه میزان مصرف اکسیژن و همچنین پودر کربن در کوره‌های مدرن افزایش یافته است. کارخانه اشتالبرگ در این زمینه فعالیت‌های بزرگی انجام داده است که منجر به افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف انرژی در تولید فولاد شده است. استفاده از سیستم تزریق اکسیژن و کربن به کوره باعث ایجاد سرباره پفکی و توزیع یکنواخت آن در تمام

کوره می‌شود. این موضوع باعث انتقال بهتر انرژی به مذاب و توزیع یکنواخت حرارت در داخل کوره، تنظیم کربن مورد نیاز مذاب کوره، کاهش تشعشع به دیواره کوره، جلوگیری از شکل‌گیری نقاط سرد و کاهش مصرف الکتروود گرافیتی می‌گردد. با استفاده از دمش اکسیژن اضافی می‌تون زمان فرایند کوره قوس و نیز مصرف الکتروود را به ترتیب حدود ۳۳٪ و ۲۱٪ کاهش داد.

نکته مهمی که در سیستم تزریق اکسیژن و کربن بایستی مورد توجه قرار بگیرد، میزان تزریق این دو ماده می‌باشد. هنگام استفاده از دمش اکسیژن برای سوزاندن کربن، جهت جلوگیری از اکسیدی شدن مذاب و افزایش اکسیداسیون آهن فلزی، باید به مقدار کربن در طراحی شارژ کوره و همچنین متناسب با آن به مقدار اکسیژنی که در کوره دمیده می‌شود، توجه نمود. قابلیت انحلال اکسیژن در فولاد متناسب با مقدار کربن در فولاد می‌باشد. مقدار کربن به‌شدت تابع اکسید آهن موجود در سرباره بوده و حضور کربن بالا در مذاب باعث کاهش اکسید آهن در سرباره می‌شود. بنابراین میزان اکسیژن شارژ شده به کوره با توجه به میزان کربن شارژ شده و بر اساس محاسبات استوکیومتری صورت می‌گیرد. استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری جهت تجزیه و تحلیل رخدادهای صورت گرفته در حین فرایند می‌تواند بسیار کارگشا باشد. در این زمینه مجتمع صنعتی فولاد خراسان فعالیت‌های مؤثری انجام داده است. همچنین در تحقیق دیگری در شرکت فولاد خوزستان تأثیر درصد کربن آهن اسفنجی شارژ شده به کوره EAF بر روی مصرف انرژی و هزینه تولید بررسی شده است. همچنین در این تحقیق تأثیر دو روش تزریق کربن و افزایش کربن به‌صورت توده‌ای در هنگام شارژ قراضه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نکته‌ای که در اینجا مورد توجه قرار گرفته، این است که با افزایش میزان کربن در DRI میزان آهن آن کم شده و نیاز به شارژ بیشتر آهن اسفنجی می‌باشد. افزایش درصد کربن بدون کاهش درصد آهن از ادعاعات جدید در حوزه کوره‌های میدرکس می‌باشد [۲۰].

جدول ۴: آنتالپی واکنش عناصر مختلف در واکنش با اکسیژن در کوره قوس الکتریکی.

reaction				energy of the reaction	
2 Al	+	1.5 O ₂	→	Al ₂ O ₃	- 8.61 kWh/kg _{Al} -13.86 kWh/m ³ O ₂
Si	+	O ₂	→	SiO ₂	- 8.70 kWh/kg _{Si} -10.92 kWh/m ³ O ₂
Mn	+	0.5 O ₂	→	MnO	-1.95 kWh/kg _{Mn} -9.56 kWh/m ³ O ₂
2 Cr	+	1.5 O ₂	→	Cr ₂ O ₃	-3.05 kWh/kg _{Cr} -9.44 kWh/m ³ O ₂
S	+	O ₂	→	SO ₂	-2.75 kWh/kg _S -3.94 kWh/m ³ O ₂
2 Fe	+	1.5 O ₂	→	Fe ₂ O ₃	- 2.03 kWh/kg _{Fe} -4.74 kWh/m ³ O ₂
Fe	+	0.5 O ₂	→	FeO	- 1.32 kWh/kg _{Fe} -6.58 kWh/m ³ O ₂
C	+	O ₂	→	CO ₂	- 9.10 kWh/kg _C -4.88 kWh/m ³ O ₂
C	+	0.5 O ₂	→	CO	- 2.55 kWh/kg _C -2.73 kWh/m ³ O ₂
CO	+	0.5 O ₂	→	CO ₂	- 2.81 kWh/kg _{CO} -7.02 kWh/m ³ O ₂



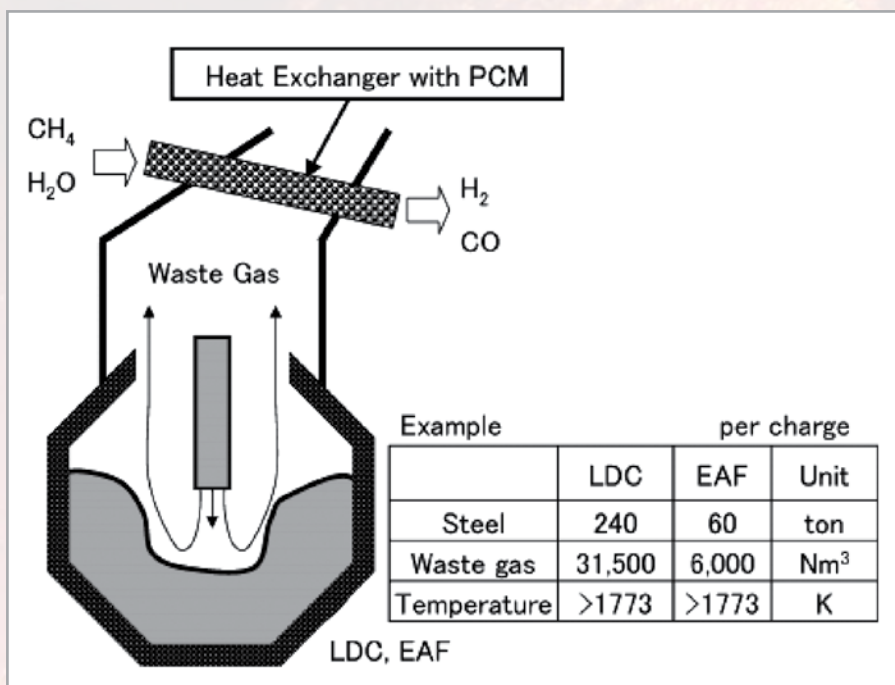
شکل ۲۱: تأثیر تزریق اکسیژن و مواد کربنی بر مصرف انرژی الکتریکی کوره قوس الکتریکی ۱۵۰ تنی.

پارامترها مستقیماً بر روی میزان انرژی مصرفی در کوره EAF تأثیر گذار می باشد. سیلیس اصلی ترین جز خاکستر بوده که با پوشش حباب های $CO-CO_2$ ، باعث تعویق احیای اکسید آهن می شود. بنابراین افزایش میزان خاکستر کربن تزریقی منجر به افزایش مصرف انرژی خواهد شد. هر چه میزان خاکستر کک کمتر باشد، مقدار کربن ثابت کک و کربن مذاب نیز افزایش یافته و در نتیجه برای کاهش کربن مذاب و رسیدن به مقدار کربن مذاب حالت مینا، باید اکسیژن افزایش یابد تا ترکیب مذاب حالت مینا حاصل گردد. همچنین با کاهش خاکستر کک، نیاز به مواد سرباره ساز نظیر آهک و دولومیت نیز کمتر می شود. میزان سرباره ایجاد شده در این حالت کاهش یافته و مصرف انرژی نیز کاهش خواهد یافت. افزایش مقدار سرباره باعث کاهش حجم قابل استفاده برای فولادسازی می شود. از طرف دیگر میزان تلفات آهن به صورت اکسید آهن افزایش می یابد. هرچقدر میزان ترکیبات حاوی مواد فرار نظیر

در شکل ۲۱ نمونه ای اثر افزودن کربن به صورت تزریقی و توده ای بر کاهش مصرف انرژی الکتریکی کوره EAF نشان داده شده است. همچنین تأثیر تزریق اکسیژن و مواد کربنی بر کاهش مصرف انرژی الکتریکی کوره قوس الکتریکی ۱۵۰ تنی واضح است. ملاحظه می شود که با افزایش مقدار کربن شارژ شده و دبی اکسیژن تزریق شده به کوره، مصرف انرژی الکتریکی کاهش می یابد.

۳-۶-۱ بررسی شرایط کربن تزریقی و کک

میزان خاکستر کربن و کک مورد استفاده در صنایع فولاد از اهمیت بالایی برخوردار است. خاکستر به عنوان مانع مستقیم بین مذاب و ماده کربنی عمل نمود و در نتیجه واکنش کربن با اکسیژن در داخل مذاب کاهش یافته و CO کمتری ایجاد می شود، در نتیجه انرژی آزاد شده از اکسایش ماده کربنی کاهش می یابد، همچنین مانع ایجاد سرباره پفکی پایدار می شود که همان طور که بیان شد این



شکل ۲۲: سیستم بازیابی حرارتی پیشنهادی برای گازهای خروجی از EAF در فرایند بازیابی متان-بخار [۲۴].

هیدروکربن‌های سبک و سنگین در کربن تزریقی و کک بیشتر باشد، امکان احیای اکسید آهن سرباره و تولید حباب‌های CO کمتر خواهد شد و واکنش‌های مربوط به پفکی شدن سرباره به خوبی انجام نمی‌گیرد؛ در نتیجه میزان انرژی مصرفی افزایش خواهد یافت [۲۱، ۲۲].

۷-۳- بازیابی انرژی حرارتی گازهای خروجی از کوره‌های قوس الکتریکی

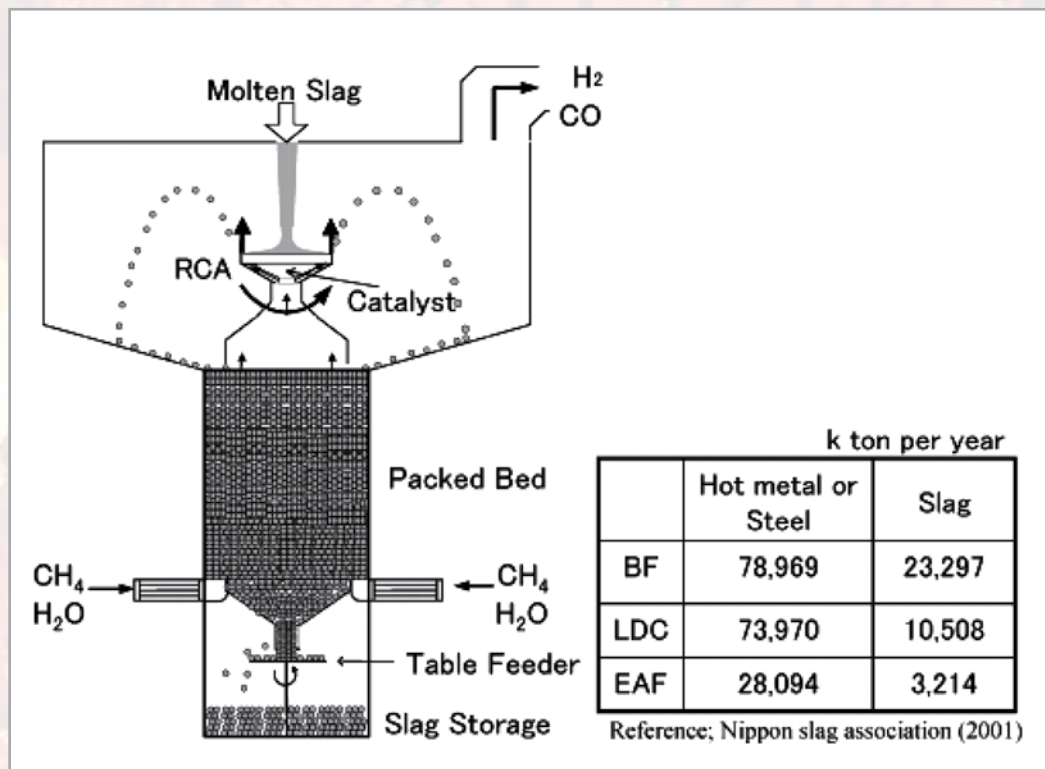
گاز و غبارهای خروجی از کوره قوس دارای دما و انرژی بالایی هستند. بر طبق تئوری انرژی، حرارت اضافی دمای بالا باید به عنوان یک منبع حرارتی دمای بالا به کار برده شود. بنابراین روش‌های قدیمی استفاده از حرارت اضافی دمای بالا به وسیله تولید بخار یا آب داغ، غیر مؤثر و کم بازده است. همان‌طور که در بخش ۱-۳ مطرح شد، می‌توان از گازهای خروجی از کوره EAF جهت پیش گرم کردن آهن اسفنجی و قراضه استفاده نمود. همچنین می‌تواند از این انرژی حرارتی بالا جهت تولید بخار داغ استفاده نمود. بخار تولید شده می‌تواند برای راه‌اندازی پمپ‌های محفظه گاز زدایی خلأ، کمپرسورهای پلنت اکسیژن و سیکل تبرید مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان از بخار فوق‌العاده داغ برای تولید برق نیز استفاده نمود. از تماس آب با گازهای داغ خروجی از کوره می‌توان بخار اشباع ایجاد نمود و سپس با استفاده از تجهیزات سوپر هیت به بخار فوق‌العاده داغ دست یافت. سیکل رانکین اورگانیک نمونه‌ای تجهیزات موفق در زمینه تولید بخار فوق‌العاده داغ می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان سهم بالایی از برق مصرفی در کارخانه را تأمین نمود.

می‌توان از حرارت اضافی تولید شده در ترکیب با واکنش‌های گرماگیر استفاده نمود. یکی از روش‌هایی که به عنوان یک فرایند ترکیبی برای بازیابی حرارت حاصله از گاز اضافی دمای بالا و سرباره مذاب استفاده می‌شود، واکنش بازیابی بخار متان است. واکنش مذکور گرماگیر بوده و به مقدار زیادی در فرایندهای احیا مستقیم و برای تولید گاز H₂ از گاز طبیعی استفاده می‌شود.

این فرایند ترکیبی قابلیت تولید هیدروژن با استفاده از حرارت دمای بالای اضافی مانند گاز خروجی از کوره و سرباره فولادسازی را دارد. سیستم پیشنهادی برای این روش به دو صورت بازیابی حرارت از گاز اضافی و بازیابی حرارت از سرباره فولادسازی می‌باشد [۲۳].

یکی از روش‌های مطرح شده جهت بازیابی حرارتی روش PCM^۱ می‌باشد. استفاده از گرمای پنهان بین فاز جامد و مایع با استفاده از PCM برای بازیابی و ذخیره گاز آزاد شده به صورت متناوب و استفاده از آن به عنوان منبع حرارتی با دمای ثابت برای فرایند دیگر مناسب است.

در این فرایند همان‌طور که در شکل ۲۲ نشان داده شده است، یک محفظه واکنش شامل PCM بالایی کوره EAF قرار می‌گیرد. PCM در محفظه واکنش در طول مدت عملیات، ذوب می‌شود و حرارت اضافی را ذخیره می‌کند. حرارت ذخیره شده برای واکنش گرماگیر فرایند بازیابی متان-بخار، در طول مدت عملیات و تخلیه EAF استفاده می‌شود. بنابراین توسعه گلوله‌های PCM می‌تواند حرارت دمای بالای آزاد شده را در یک دمای ثابت نگه دارد و همچنین به عنوان یک کاتالیست عالی در فرایند بازیابی بخار استفاده شود [۲۴].



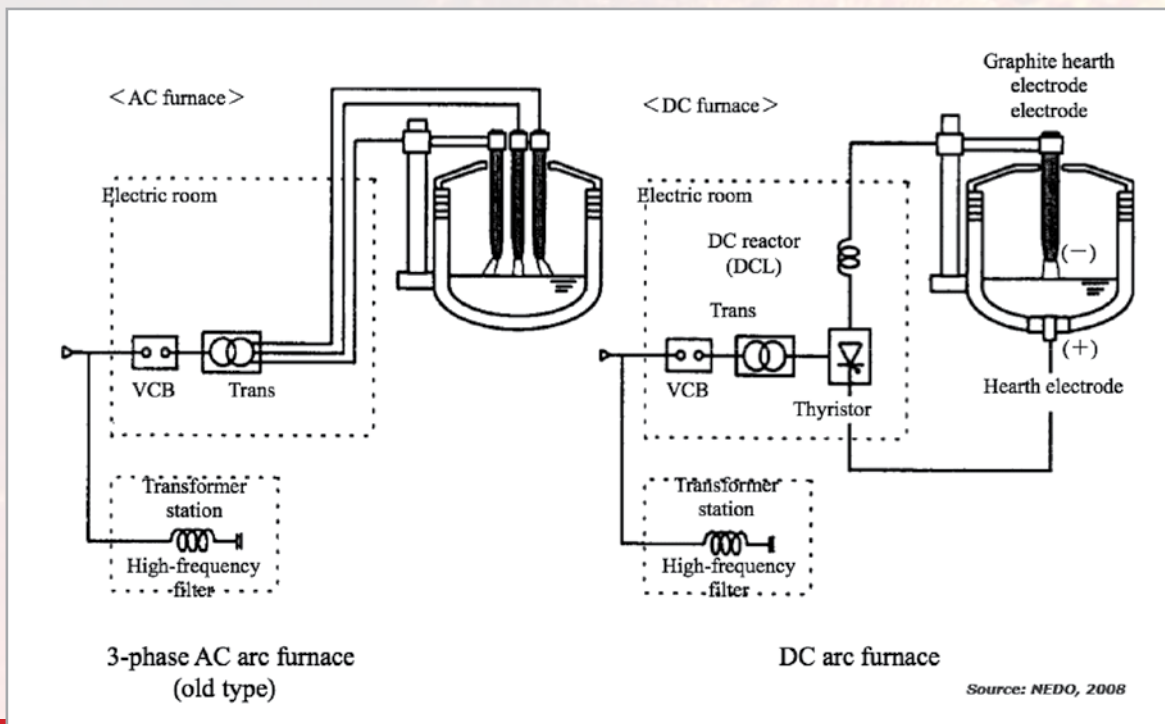
شکل ۲۳: سیستم پیشنهادی برای بازیابی حرارت از سرباره فولادسازی (سیستم RCA) [۲۴].

نشان داده شده است. برای اینکه بازیابی حرارتی در طول واکنش گرماگیر امکان پذیر باشد، متان و آب در قسمت پایینی بستر ثابت تولید می شود. بستر ثابت، بخار و متان را پیش گرم کرده و سپس آن ها را به هیدروژن و CO تبدیل می کند. برای این فرایند از کاتالیست نیکل در پایین RCA استفاده می شود [۲۴].

همچنین می توان از استفاده از روش RCA بدون استفاده از آب و با استفاده از انرژی حرارتی اتلافی در کوره های EAF، سرباره گرانوله ایجاد نمود. در مقایسه با روش معمولی همراه با آب برای تولید گرانوله سرباره، در روش RCA بخار و سولفور هیدروژن تولید نمی شود و همچنین آلودگی آب نیز رخ نمی دهد. در سیستم RCA، یک بستر ثابت به وسیله سرباره گرانوله شده در زیر RCA ایجاد می شود که در شکل ۲۳



1- Rotary Cup Atomizer



شکل ۲۴: شماتیک کوره‌های قوس الکتریکی AC و DC [۲۳].

۳-۹ انواع روش‌های مرسوم کاهش مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی

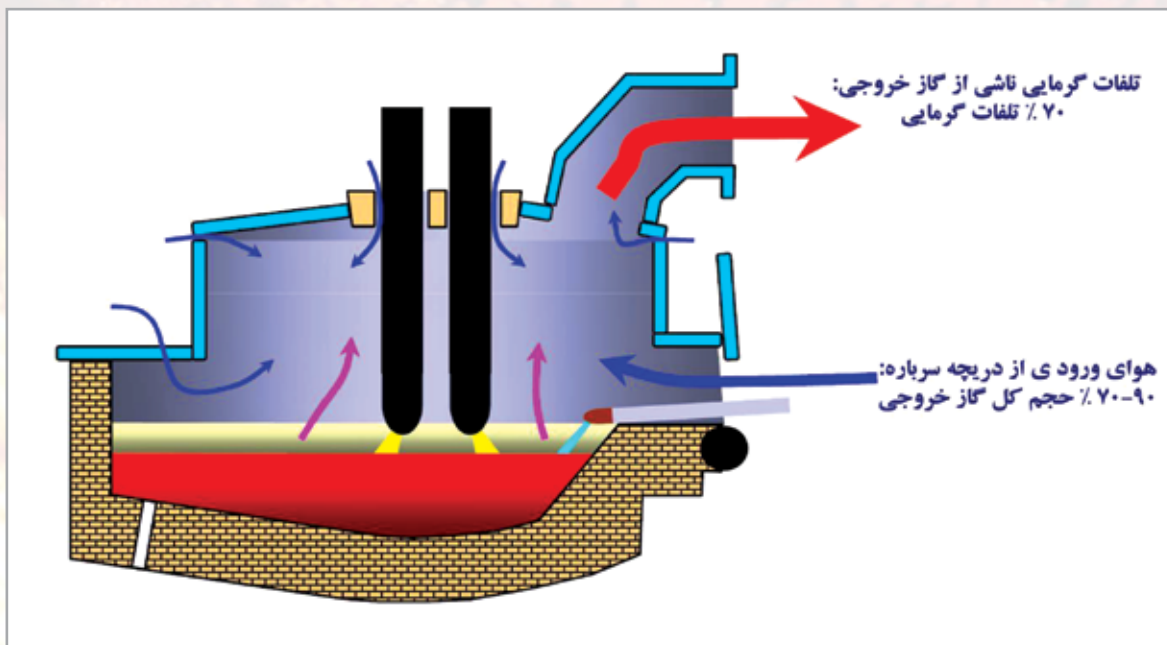
۳-۹-۱ مشعل‌های سوخت-اکسیژن

استفاده از این مشعل‌ها، یک منبع حرارتی کمکی در کوره قوس ایجاد می‌کند. مشعل‌ها می‌توانند قبل و یا هنگام برقراری جریان الکتریسیته روشن شوند و زمان کاری آن‌ها بستگی به خواص فیزیکی و شیمیایی شارژ دارد. با استفاده از این مشعل‌ها می‌توان انرژی حرارتی ورودی به کوره را افزایش داد و نواحی بین الکترودها را گرم نمود. افزایش سرعت ذوب، کاهش مصرف الکترود و انرژی الکتریکی از جمله مزایای استفاده از این مشعل‌ها می‌باشد. مشعل‌ها به سه گروه مشعل دریچه سرباره، مشعل دیواره کوره و مشعل سقفی تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۰، ۲۶].

۳-۸ کوره قوس الکتریکی با جریان مستقیم

یکی از راهکارهای مطلوب جهت کاهش مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی با سائیز بالا استفاده از سیستم جریان مستقیم به جای جریان متناوب می‌باشد. در این حالت تنها یک الکترود استفاده شده و ته محفظه کوره قوس به عنوان آند عمل می‌نماید. محاسبات انجام گرفته نشان می‌دهد که در کوره قوس با جریان DC به میزان حدود ۵٪ انرژی مصرفی کمتر از کوره‌های سه فازی با جریان AC می‌باشد. همچنین کوره‌های قوس DC بازدهی ذوب بالاتر داشته و عمر کاری آن‌ها نیز بیشتر می‌باشد. میزان مصرف الکترود نیز در کوره‌های DC تقریباً نصف کوره‌های متداول است. این تکنولوژی قابلیت کاهش میزان انتشار گاز CO_2 تا حدود ۵۲٫۹ $\text{Kg CO}_2/\text{t-steel}$ را دارد. شماتیک از دو کوره قوس الکتریکی AC و DC در شکل ۲۴ نشان داده شده است [۲۳، ۲۵].





شکل ۲۵: کنترل هوای ورودی و خروجی در کوره قوس الکتریکی.

۳-۹-۲ سیستم مسدودکننده ورود هوا

کاهش ورود هوا به کوره باعث کاهش مصرف انرژی الکتریکی، کاهش توان سیستم مکش کوره و کاهش گردوغبار خروجی از کوره می‌شود. در این سیستم نیاز به وسایل آب‌بندی ویژه‌ای بوده و فقط در چند واحد کوچک فولادسازی در آلمان مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین بستن درب سرباره به صورت مقطعی نیز باعث کاهش تلفات گرمایی و حتی کاهش اکسید آهن در سرباره می‌شود. این موضوع به صورت شماتیک در شکل ۲۵ نشان داده شده است [۱۰].

۳-۹-۳ برهم زدن مذاب

جابجایی در حمام مذاب باعث از بین رفتن گرادیان حرارتی و ترکیبی حمام مذاب می‌شود، بنابراین با کاهش زمان ذوب و همگن‌سازی ترکیب و دما منجر به کاهش مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی می‌شود. همزدن به دو دسته همزن القایی و همزدن با استفاده از گاز خنثی تقسیم‌بندی می‌شود.

همزن القایی: در این حالت، سیم‌پیچ‌های القایی در زیر پوسته کوره قوس الکتریکی و به شکل کف آن، معلق می‌باشند.

همزن گاز خنثی: از دمش گاز خنثی نظیر نیتروژن و آرگون برای به همزدن در حمام مذاب استفاده می‌شود. سیستم دمش گاز خنثی از کف کوره EAF یکی از روش‌های استفاده شده در این زمینه است. استفاده از این روش به پفکی شدن سرباره کمک کرده و باعث کاهش گازهای محلول در مذاب می‌شود [۲۷].

۳-۹-۴ افزایش توان و ولتاژ ثانویه ترانسفورمرها

با افزایش ولتاژ ثانویه ترانسفورمرها، مصرف انرژی الکتریکی در کوره قوس کاهش یافته و قوس ایجاد شده از پایداری بیشتری برخوردار می‌باشد. در این حالت میزان تنش‌های مکانیکی به تجهیزات کوره کاهش یافته و اغتشاشات الکتریکی ارسالی به شبکه برق نیز کم می‌شود [۱۰].

۳-۹-۵ عملیات با ته ذوب (Hot Heel)

باقی ماندن ۲۰-۱۵٪ مذاب و مقداری سرباره در کف کوره پس از هر تخلیه باعث افزایش بازدهی و کاهش اکسید آهن در سرباره می‌شود. همچنین در کوره‌های با توان بالا، حضور لایه مذاب در کف کوره باعث جلوگیری از آسیب‌دیدگی کف نسوز در اثر قوس الکتریکی می‌شود. همچنین به هنگام استفاده از درصد بالای آهن اسفنجی در کوره قوس و لزوم تخلیه فولاد تمیز و بدون سرباره، استفاده از این تکنیک ضروری می‌باشد. علاوه بر مزایای ذکر شده، به کارگیری Hot Heel منجر به تثبیت قوس در مراحل اولیه ذوب و امکان ایجاد سرباره پفکی می‌شود [۱۰].

۳-۹-۶ استفاده از سیستم‌های کنترل کامپیوتری

استفاده بیشتر از کامپیوتر برای کنترل فرآیند، باعث بهبود بهره‌وری شده است. از سیستم‌های کنترل کامپیوتری می‌توان به طور وسیعی برای انجام تعدادی از عملیات بهره گرفت که شامل موارد زیر هم می‌گردد: کنترل وضعیت، محاسبه نیازهای انرژی برای یک (شارژ) مواد خام و کنترل نیروی برق طی یک دوره ذوب و یا برای تقسیم نیروی برق

همچنین انتشار گاز CO₂ برای روندهای مختلف تولید فولاد در شکل ۲۶ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، ایده آل ترین روش برای کاهش مصرف انرژی، استفاده کامل از قراضه به عنوان منبع آهن در تولید فولاد می باشد.

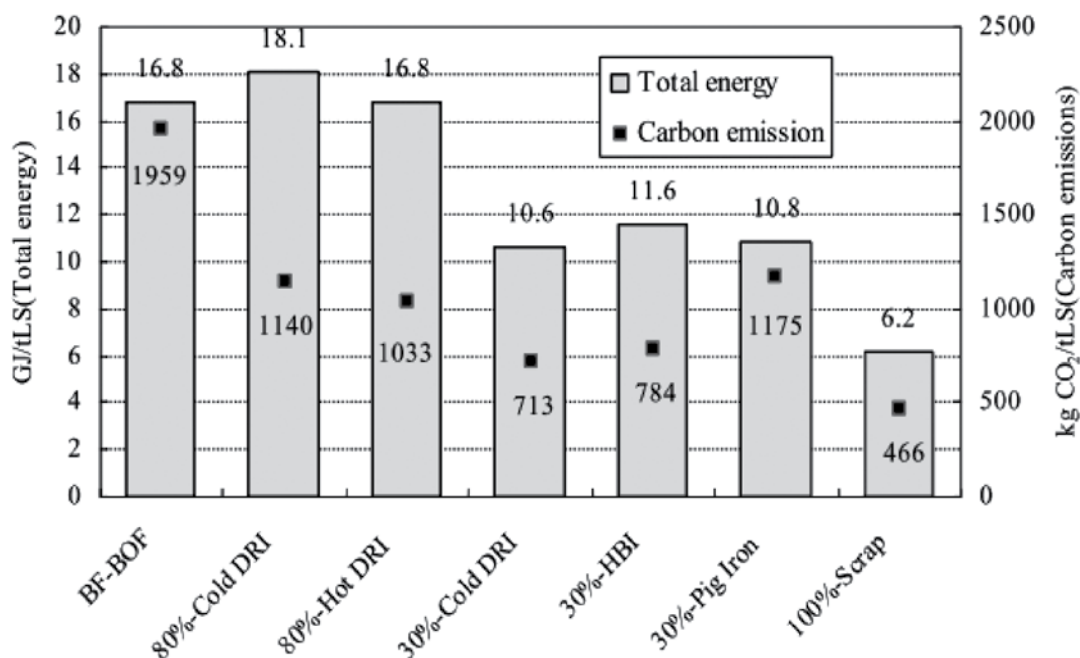
با توجه به تحقیقات صورت گرفته در این پژوهش، استفاده از سیستم های مدرن در کوره میدرکس همراه با دمش اکسیژن به منظور افزایش دمای حرارت گاز ورودی به کوره از راهکارهای مناسب جهت بهینه سازی مصرف انرژی می باشد. همچنین با توجه به مطالب بیان شده، استفاده بهینه از دمای بالای گازهای خروجی از کوره قوس الکتریکی به منظور پیش گرم قراضه و سنگ آهن و کمک به واکنش متان، استفاده از فرایند Hot-Link، توجه ویژه به ابعاد و نحوه شارژ قراضه، استفاده از انرژی حرارتی واکنش های گرمای در کوره قوس، ایجاد سرباره پفکی ایده آل و استفاده از لاستیک های فرسوده به عنوان منبع کربن می تواند از بهترین راهکارها جهت کاهش مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی باشد.

جهت امکان سنجی استفاده از طرح های پیشنهاد شده در این تحقیق در صنعت فولاد ایران، نیاز به مطالعات پایه ای بررسی میزان بازدهی می باشد. امید است با انجام مطالعات آینده نگاری در زمینه کاهش مصرف انرژی در صنعت فولاد گام هایی اساسی و مؤثر در آینده نزدیک برداشته شود.

بین چند کوره که با هم بکار گرفته می شوند. وظایف اساسی دیگر کامپیوتر شامل ثبت وقایع منطقی، ثبت عملکرد نامناسب کنترل و نظارت بر وسایل حفاظتی مراحل عملیات (مانند قفل سوئیچ های کنسول کنترل کننده) و نمایش وضعیت می باشد. با استفاده از سیستم های کنترل پویا که متغیرهای ورودی آن از طریق دستی وارد و یا با نظارت گیرنده های حساس لحظه ای کنترل می شوند، می توان آخرین وضعیت فرآیند را به طور پیوسته نمایش داد و تصحیحات لازم را در ورودی ها هدایت نمود. برای مثال می توان از این تصحیحات و تنظیم های روی میزان نیروی برق، عملکرد مشعل ها، میزان دمش اکسیژن از طریق لانس و غیره انجام داد. به این ترتیب، جلوگیری از اشتباهات و خطاها و همچنین بهبود در کنترل دقیق می تواند در جهت افزایش بهره وری مؤثر واقع شود که در انرژی مصرفی تأثیر به سزایی دارد [۱۰].

نتیجه گیری:

با توجه به مصرف انرژی بالا در صنعت تولید فولاد و همچنین میزان نرخ بالای انرژی اتلافی در این صنعت، به کارگیری روش های نوین جهت کاهش مصرف انرژی و استفاده بهینه از انرژی های اتلافی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. استفاده از تجربیات مختلف و موفق بین المللی در این زمینه بسیار راهگشا می باشد. میزان انرژی مورد نیاز و



شکل ۲۶. انرژی مورد نیاز و میزان انتشار CO₂ برای روندهای مختلف تولید فولاد.

- [1] S. Shafiee, E. Topal, When will fossil fuel reserves be diminished?, *Energy policy*, 37 (2009) 181-189.
- [2] E. Worrell, R. Van Berkel, Z. Fengqi, C. Menke, R. Schaeffer, R.O. Williams, Technology transfer of energy efficient technologies in industry: a review of trends and policy issues, *Energy policy*, 29 (2001) 29-43.
- [3] T.G. Gutowski, S. Sahni, J.M. Allwood, M.F. Ashby, E. Worrell, The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371 (2013) 20120003.
- [4] E. Worrell, P. Blinde, M. Neelis, E. Blomen, E. Masanet, Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the US iron and steel industry an ENERGY STAR (R) guide for energy and plant managers, (2011).
- [5] M. Atsushi, H. Uemura, T. Sakaguchi, MIDREX Processes, *Kobelco Technology Review*, 29 (2010) 50-57.
- [6] T. Harada, H. Tanaka, Future steelmaking model by direct reduction technologies, *ISIJ international*, 51 (2011) 1301-1307.
- [7] M. Kirschen, K. Badr, H. Pfeifer, Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry, *Energy*, 36 (2011) 6146-6155.
- [8] B. Sandberg, Undvall, "Energy optimisation of electric arc furnaces by statistical process evaluation", in: 7th European Electric Steelmaking Conference proceedings, 2002, pp. 435-444.
- [9] J. De Beer, E. Worrell, K. Blok, Future technologies for energy-efficient iron and steel making, *Annual Review of Energy and the Environment*, 23 (1998) 123-205.
- [10] B. Lee, I. Sohn, Review of innovative energy savings technology for the electric arc furnace, *Jom*, 66 (2014) 1581-1594.
- [11] J. Jones, B. Bowman, P. Lefrank, The Making, Shaping, and Treating of Steel—Steelmaking and Refining Volume, in, *The AISE Steel Foundation*, Pittsburgh, PA, 1998.
- [12] M. Si, S. Thompson, K. Calder, Energy efficiency assessment by process heating assessment and survey tool (PHAST) and feasibility analysis of waste heat recovery in the reheat furnace at a steel company, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011) 2904-2908.
- [13] M. Eissa, Effect of slag foaming and lime injection in electric arc furnace on steel quality, in: 54 th Electric Furnace Conference, 1996, pp. 123-128.
- [14] H. Matsuura, R.J. Fruehan, Slag Foaming in an electric arc furnace, *ISIJ international*, 49 (2009) 1530-1535.
- [15] L.G. Rubén, F. López, J. Camacho, R. JA, The slag foaming practice in EAF and its influence on the steelmaking shop productivity, *ISIJ international*, 35 (1995) 1054-1062.
- [16] R. Dash, C. Das, Recent developments in iron and steel making industry, *Journal of Engineering Innovation and Research Volume*, 1 (2009).
- [17] F.L. Stebbing, Methods of using tires and scrap rubber in the manufacture and melting of steel and other metals, in, *Google Patents*, 2008.
- [18] H. Yamakawa, K. Isakara, Study on dioxin reduction & behavior of it in EAF, *La Revue de Metallurgie*, 23 (2002).
- [19] J. Gorez, B. Gros, J. Birat, C. Grisvard, J. Huber, X. Le Coq, Charging tires in the EAF as a substitute to carbon, *Revue De Metallurgie Cahiers D Information Techniques*, 100 (2003) 17-24.
- [20] L. Wolfe, J.P. Massin, T. Hunturk, W. Ripamonti, LIME INJECTION TECHNOLOGY—A VIABLE TOOL FOR THE ELECTRIC ARC FURNACE, *SCANMET*, 3 (2008) 3rd.
- [21] M. Rahman, R. Khanna, V. Sahajwalla, P. O'Kane, The influence of ash impurities on interfacial reactions between carbonaceous materials and EAF slag at 1550 C, *ISIJ international*, 49 (2009) 329-336.
- [22] F. McCarthy, V. Sahajwalla, J. Hart, N. Saha-Chaudhury, Influence of ash on interfacial reactions between coke and liquid iron, *Metallurgical and materials transactions B*, 34 (2003) 573-580.
- [23] Y.N. Toulouevski, I.Y. Zinurov, *Innovation in electric arc furnaces*, Nova Iorque: Springer, (2010) 1-23.
- [24] N. Maruoka, T. Mizuochi, H. Purwanto, T. Akiyama, Feasibility study for recovering waste heat in the steelmaking industry using a chemical recuperator, *ISIJ international*, 44 (2004) 257-262.
- [25] P. Ladoux, G. Postiglione, H. Foch, J. Nuns, A comparative study of AC/DC converters for high-power DC arc furnace, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52 (2005) 747-757.
- [26] M. Kirschen, V. Risonarta, H. Pfeifer, Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry, *Energy*, 34 (2009) 1065-1072.
- [27] H. Zhang, H. Wang, X. Zhu, Y.-J. Qiu, K. Li, R. Chen, Q. Liao, A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry, *Applied Energy*, 112 (2013) 956-966.



مراجع فارسی

- راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت فولاد کشور، عبدالله اعزازی، مسعود عزتی، حمید زواری، سمپوزیم فولاد ۱۳۸۸.
- ارزیابی استفاده از شارژ داغ در کاهش مصرف انرژی و افزایش ظرفیت کوره‌های بازگرم کارخانه ذوب‌آهن اصفهان با استفاده از شبیه‌سازی حرارتی، عمادی اندانی، علی، سعید جعفری و مجیدرضا بدیع صنایع و حسن خزائی، سمپوزیم فولاد ۱۳۸۹.
- بهینه‌سازی مصرف آهن و دولومیت به روش تزریق از طریق دیواره کوره قوس الکتریکی و بررسی تأثیر آن بر فرآیند فولادسازی، تقی زنگنه، کنگره ملی صنایع آهن و فولاد ۱۳۹۳.
- بررسی اثر تغییرات درصد کربن آهن اسفنجی بر روی مصرف انرژی کوره‌های قوس الکتریکی، سروش پرویزی، هومن فخرنویری، سید خطیب الاسلام صدر نژاد، مهران خرم نیا، یازدهمین کنگره سالانه انجم مهندسين متالورژی ۱۳۸۶.
- بررسی و مطالعه کوره‌های قوس الکتریکی به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی، علی روغنی عراقی، عارف درودی، همایش ملی سوخت، انرژی و محیط زیست ۱۳۸۷.
- بررسی اثر افزایش شارژ داغ بر روی مصرف انرژی الکتریکی و هزینه‌های تولید کوره‌های قوس الکتریک، سروش پرویزی، هومن فخر نبوی، سید خطیب الاسلام صدر نژاد، مهران خرم نیا، یازدهمین کنگره سالانه انجم مهندسين متالورژی ۱۳۸۶.
- بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی مواد کربنی بر مصرف انرژی کوره قوس الکتریکی مجتمع صنعتی فولاد خراسان، احد ضابط، امیر شاه‌پسندی، اولین همایش بین‌المللی و ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران ۱۳۹۱.
- لاستیک‌های فرسوده جایگزین انرژی و کربن در فولادسازی، محمد حسن جولازاده، سومین کنگره ملی بازیافت و استفاده از منابع آلی تجدید شونده در کشاورزی ۱۳۸۷.
- بهینه‌سازی مصرف انرژی در کوره‌ها، محمدرضا یزدانی، دومین همایش ملی انرژی ۱۳۷۸.
- بهینه‌سازی مصرف انرژی کوره‌های قوس الکتریکی با اصلاح بارگیری قراضه، امیر شریف یزدی، محمدجواد حسامی فر، سید محمدرضا میرجلیلی، ششمین همایش ملی انرژی ۱۳۹۰.
- کاهش مصرف انرژی الکتریکی در کوره‌ی قوس الکتریکی با استفاده از واکنش اکسیژن-کربن، علی شیرانی بیدآبادی، سید محمد موسوی، علی برونی، دومین همایش بین‌المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن ریخته‌گری ایران ۱۳۹۲.
- تأثیر سرباره پفکی در کوره قوس الکتریکی بر مصرف انرژی الکتریکی، سیما امین الرعیا، حسین ادریس، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته در مهندسی، دوره ۲۱ سال ۱۳۸۱.
- آنالیز و اکسرژی کوره‌های قوس الکتریک فولاد و تأثیر پیش گرمایش بر کاهش مصرف انرژی، ابراهیم حاجی دلو، حمزه دشتی، اولین کنفرانس سراسری اصلاح الگوی مصرف انرژی الکتریکی ۱۳۸۸.

ارزیابی جامع جهت کاهش مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ در صنایع آهن و فولاد بر پایه آنالیز جریان مواد دینامیک

پژوهشکده فولاد - دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده:

جهت بررسی پتانسیل ذخیره انرژی و کاهش انتشار گاز در طول دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۵۰ میلادی در صنعت فولاد، مطالعه‌ای جامع بر پایه مدل آنالیز جریان مواد (MFA) و مدل مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ انجام گرفت. ۴ سناریوی مختلف شامل بیزینس معمولی (BAU)، سناریو تنظیم ساختار (STA)، سناریو بهبود بهره‌وری انرژی (EEI) و سیاست تقویت‌شده (STP) جهت توصیف استراتژی‌های آینده به‌منظور ذخیره انرژی و کاهش کربن در ارتباط با توسعه صنعت آهن و فولاد مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده نشان داد که تقاضای جهانی فولاد ابتدا افزایش و سپس با نزدیک شدن به سال‌های پایانی دوره ۲۰۱۵-۲۰۵۰ کاهش می‌یابد. همچنین منابع قراضه موجود جهت حمایت از ارتقا ساختار تولید تحت هر ۴ سناریو کافی می‌باشد. نتایج به دست آمده همچنین نشان داد که مصرف انرژی و انتشار CO₂ تحت اثرات سینرژیسم ارتقا تکنولوژی و تنظیمات ساختاری در طول دوره زمانی مورد مطالعه، به تدریج کاهش می‌یابد. کاهش مصرف انرژی و انتشار CO₂ در کوتاه‌مدت به میزان زیادی وابسته به بهبودهای تکنولوژیکی و در بلندمدت به‌خصوص بعد از سال ۲۰۴۰ میلادی وابسته به ترویج تنظیم ساختار تولید می‌باشد. ۳۵ تکنولوژی ذخیره انرژی در کاهش نرخ انرژی و انتشار گاز CO₂ برای تولید فولاد خام شرکت داشتند، که اثر بخشی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۱- مقدمه:

در سال‌های اخیر اثرات شدید مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ بر تغییرات اقلیمی و کاهش منابع انرژی، توجهات و نگرانی‌های زیادی را در سراسر جهان به خود معطوف کرده است. تلاش در جهت کاهش انتشار گاز CO₂ در تمامی صنایع به‌خصوص صنعت آهن و فولاد به‌منظور مقابله با تغییرات اقلیمی جهانی از وظایف مهم و حیاتی می‌باشد. توجه به میزان مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ و کاهش اثرات نامطلوب آن از عوامل اساسی جهت ایجاد شتاب به سمت توسعه اقتصادی و ارتقا تحولات صنعتی می‌باشد. هوشیاری عمیق در مورد اهمیت و گستردگی تأثیر و آگاهی کامل در خصوص دشواری‌ها و ضرورت وظایف مربوط به تغییرات اقلیمی، پژوهشگران را مجبور به پیش‌بینی انتشار گازهای CO₂ و مصرف انرژی در آینده کرده است.

رونق و پیشرفت صنعت آهن و فولاد هر کشور برای ارتقا اقتصاد ملی بسیار اساسی و بنیادین می‌باشد. با توجه به روند تولید فولاد از سنگ آهن و فرایندهای تکمیلی جهت تولید محصول دلخواه، مصرف انرژی، تولید و انتشار گاز CO₂ در این صنعت بسیار قابل توجه است. به‌طور مثال در سال ۲۰۱۵ صنعت آهن و فولاد تقریباً ۱۵٪ از کل انرژی مصرف شده^۱ در چین (TEC) را به همراه آزاد سازی ۱۵۳۲/۷ میلیون تن گاز CO₂ به خود اختصاص داد که این مقدار، خود برابر با ۱/۴٪ از کل گازهای CO₂ انتشار یافته^۲ (TCE) در این کشور بود [۴-۱]. با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیقات

اخیر، سه فاکتوری که بر روی کاهش میزان انرژی مصرف شده و کاهش انتشار گاز CO₂ تأثیرگذار هستند عبارتند از: روش تولید فولاد خام، ساختار تولید و نرخ پذیرش و اتخاذ تکنولوژی‌های خاص [۵-۷]

مطالعات متعددی بر روی پیش‌بینی تقاضای جهانی فولاد در آینده متمرکز شده‌اند. آلسون^۳ با استفاده از روشی که به اصطلاح «شدت استفاده»^۴ نامیده می‌شد، نیاز فولاد در آینده را برای کشورهای هند و چین پیش‌بینی کرد [۸]. وانگ^۵ و همکارانش با به کارگیری مدل «گهواره-تا گهواره»^۶، جریان فولاد در آینده را تا سال ۲۱۰۰ برای کشور چین پیش‌بینی کردند [۹]. ژوان و یوئی^۷ از مدل IPAT اصلاح شده برای پیش‌بینی میزان فولاد تولید شده چین در آینده، استفاده کردند و تأثیر آن را بر روی محیط زیست، اقتصاد، جمعیت، تکنولوژی، و سیاست ملی مورد بررسی قرار دادند [۴]. اکثر پیش‌بینی‌های انجام شده نشان از آن دارند که مصرف فولاد در دنیا، تا رسیدن به یک پیک به‌صورت پیوسته رشد خواهد کرد و سپس پس از آن به تدریج کاهش خواهد یافت. به‌عنوان مثال تولید فولاد در چین به‌عنوان بزرگ‌ترین تولید کننده و مصرف کننده فولاد دنیا به‌تدریج از سال ۲۰۱۴ کاهش یافته است. این مشی احتمالاً در آینده ادامه خواهد یافت. بنابراین بسیار ضروری است که مجموع فعالیت‌های مربوط به صنعت آهن و فولاد در آینده با استفاده از یک مدل جامع پیش‌بینی شود.

تولید فولاد خام با استفاده از قراضه‌های فولادی بازیافت شده نسبت به حالت تولید فولاد از سنگ آهن، مقدار انرژی کمتری مصرف می‌کند و همچنین به‌طور قابل توجهی گاز CO₂ کمتری انتشار می‌دهد؛ زیرا این فرآیند یعنی تولید فولاد خام با استفاده از قراضه‌های فولادی نیازی به عوامل احیاکننده همچون کک و زغال سنگ ندارد [۱۰]. میانگین مقدار انرژی مصرف شده برای تولید فولاد خام از طریق کوره قوس الکتریکی^۱ (EAF) چیزی در حدود ۰/۳ tce/t^۲ (تن معادل زغال سنگ به ازای هر تن) فولاد خام است، این در حالی است که متوسط مقدار انرژی مصرف شده برای تولید فولاد خام از طریق کوره دمشی/کوره پایه اکسیژن^۳ (BF/BOF) برابر با ۰/۵ tce/t^۲ فولاد خام است [۱۱]. پلی‌شتی^۴ و همکارانش نشان دادند که مجتمع تولید فولاد از طریق BF/BOF ۲/۱ تن گاز CO₂ به ازای هر تن فولاد خام تولیدی انتشار می‌دهد، این در حالیست که تولید فولاد از طریق EAF باعث انتشار ۰/۶ تن گاز CO₂ به ازای هر تن فولاد خام تولیدی می‌شود [۱۲]. با این حال قیمت قراضه‌های فولادی به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان استفاده آن به‌عنوان منبع آهن در تولید فولاد می‌باشد. جهت پذیرش و اتخاذ تکنولوژی‌های خاص، صنعت فولاد به‌عنوان یک صنعت سرمایه‌بر^۵ و صنعتی با تکنولوژی بالا محسوب می‌شود؛ بنابراین ارتقا و استعمال تکنولوژی‌های مبتنی بر صرفه‌جویی انرژی^۶ (ESTs) به‌عنوان یک قدم مهم برای افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش میزان مصرف

انرژی، در صنعت فولاد محسوب می‌شود [۵]. منحنی‌های تأمین حفاظت انرژی و انتشار^۷ (CSC) به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای تجزیه و تحلیل کمی اندازه‌گیری‌های بهره‌وری انرژی‌های ویژه مطرح است. ماررو^۸ و همکارانش با استفاده از روش CSC، ۲۵ اقدام قابل اجرا در راستای بهره‌وری انرژی برای صنعت آهن و فولاد هند را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۳]. همچنین لی و جو^۹ نیز تغییرات CSC که تکیه بر پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی در تولیدات آهن و فولاد چین دارند، را مورد مقایسه قرار دادند [۱۴]. در پژوهش حاضر به‌منظور تجزیه و تحلیل مزایای به‌کارگیری EST در صنعت تولید فولاد، ۳۵ EST موجود انتخاب شدند [۱۵]. بنابراین، اثر تکنولوژی‌های مربوط به بازیابی حرارت هدررفته بر بهبود بهره‌وری انرژی در نظر گرفته شده و همچنین کاهش میزان مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. اما توجه اندکی به تجزیه و تحلیل کاهش پتانسیل انتشار گاز CO₂ از بُعد فنی و اقتصادی شده است؛ علی‌الخصوص این توجه اندک در ارزیابی اثرات تکنولوژی‌های مختلف مبتنی بر صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازهای CO₂ مشهود است. در این مطالعه، مزایای کاهش میزان انتشار گازهای CO₂ و به‌کارگیری ESTs را بر صنعت فولاد نیز در نظر گرفته شده است. چندی‌ن مطالعه به‌منظور تخمین مصرف انرژی آینده و انتشار گازهای CO₂ در صنعت آهن و فولاد انجام شده



- | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1- Electric arc furnace | 4- Yellishetty | 7- Conservation supply curves |
| 2- Tce=tonnes of coal equivalent | 5- Capital-intensive | 8- Morrow |
| 3- Blast furnace/basic oxygen furnace | 6- Energy saving technologies | 9- Li and Zhu |

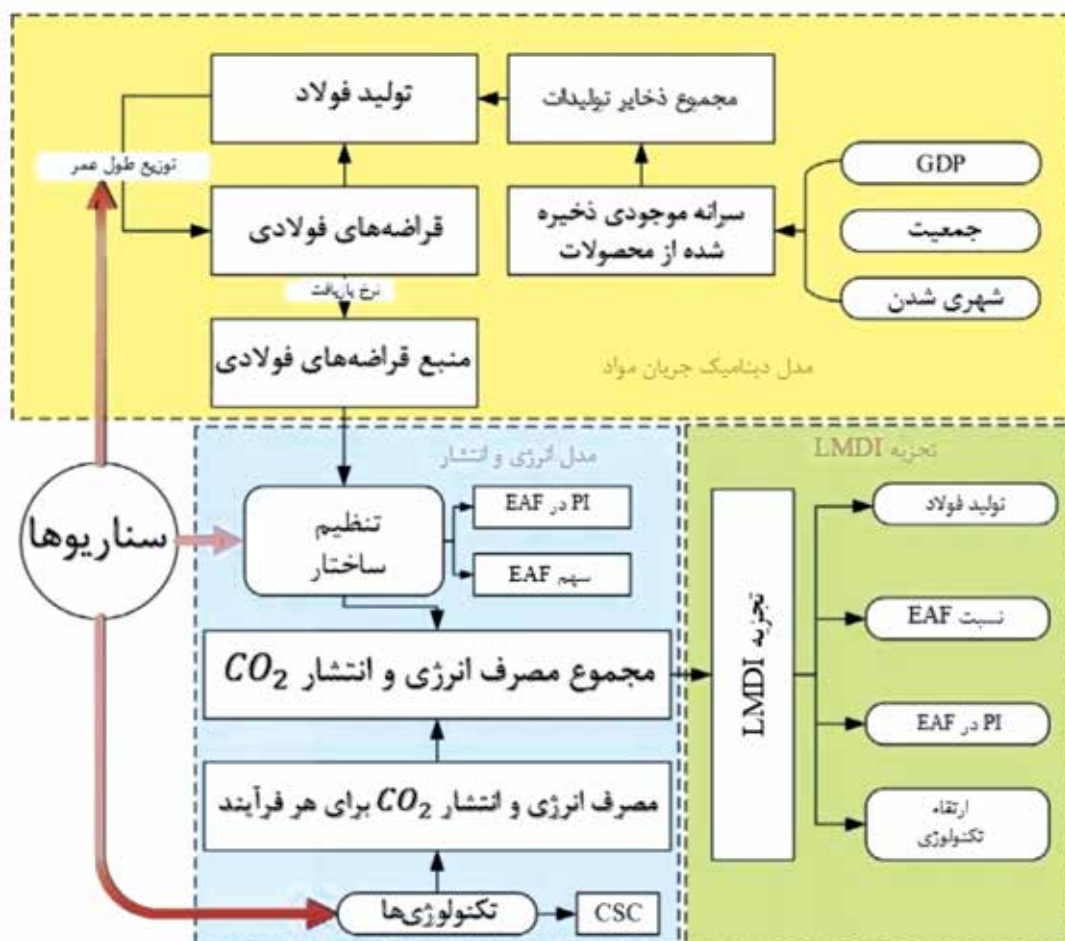
مطالعات فوق‌الذکر مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ را با تأکید بر سهم فولاد تولیدی از طریق EAF، و ارتقای تکنولوژیکی در صنعت آهن و فولاد مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. با این حال بیشتر مفروضات در نظر گرفته شده در اینجا به جای آنکه بر پایه فرآیندهای منطقی پرجزئیات باشد، بر پایه اطلاعات تاریخی است و اثر فاکتورهای تحلیل جامع برای پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گاز CO₂ کمتر مورد بحث قرار گرفته است. به دلیل کمبود قراضه‌های فولادی و هزینه بالای آن در اکثر کشورهای جهان و سایر کاستی‌ها، برای شرکت‌های تولید فولاد بر پایه کوره الکتریکی، بسیار مشکل است که برای بهره‌وری کامل پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش میزان گاز CO₂، نرخ قراضه فولادی را در EAF افزایش دهند. با در نظر گرفتن نیازهای امروز صنعت فولاد جهان که بر پایه کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای CO₂ است، بسیار ضروری است که میزان انرژی مورد استفاده و انتشار گازهای CO₂ با استفاده از نسبت‌های مختلفی از آهن اسفنجی در فرآیند EAF مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. ارزیابی جامعی از رابطه بین تولید فولاد و ارزیابی قراضه‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [۲۱]. هنوز یک تحلیل و ارزیابی جامع در خصوص رابطه تولید فولاد و در دسترس بودن قراضه‌های فولادی در بلندمدت و کوتاه‌مدت در کشورهای جهان وجود ندارد.

هدف این تحقیق پر نمودن شکاف‌های مربوط به تحقیقات قبلی بر اساس یک مدل جامع می‌باشد که این مدل متشکل از پیش‌بینی تقاضای فولاد در بلندمدت و در دسترس بودن منابع قراضه‌های فولادی، مصرف انرژی و انتشار گازهای CO₂ در بازه‌ی بین سال‌های ۲۰۱۵ الی ۲۰۵۰ می‌باشد. لذا در این مقاله LMDI مورد استفاده قرار

است [۱۶-۱۸]. آرنز^۱ و همکارانش مصرف انرژی و انتشار گازهای CO₂ در آینده را با تکیه بر مسیرهای پرجزئیات تکنولوژیکی و تغییرات در سطح تولیدات فرض شده در صنعت فولاد آلمان بررسی کردند [۱۹]. ما^۲ و همکارانش روش ارزیابی یکپارچه‌ای را بکار گرفتند که با ترکیب مدل بر پایه استوک^۳، مدل چین-TIMES و مدل تجزیه و تحلیل هم مزایا^۴ توسعه یافته بود، تا روند مصرف انرژی و انتشار گازها را در طی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰ شبیه‌سازی کند [۲۰]. نتایج آن‌ها نشان داد با تغییر^۵ ساختار تولید و اجرای تکنولوژی‌های صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازها، بخش تولید فولاد به‌طور قابل توجهی می‌تواند از مزایای صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات گازها، باهم، برخوردار شود. به‌منظور تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری اثر فاکتورهای مختلف بر شکل‌دهی روندهای مصرف انرژی در گذشته و در آینده در صنعت آهن و فولاد چین، حسن‌بیگی^۶ و همکارانش از شاخص لگاریتمی دیویزیا میانگین اصلاح شده^۷ (LMDI) استفاده کردند [۵]. نتایج آن‌ها نشان داد که اثرات ساختاری و اثر نرخ آهن اسفنجی نقش مهمی را در کاهش انرژی مورد استفاده نهایی در طی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۳۰ ایفا خواهد کرد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که بهبود بهره‌وری انرژی، پذیرش و به‌کارگیری فرآیندهای پیشرفته و تنظیم ساختار تولید، نقش بسیار مهمی را در مصرف انرژی و کاهش انتشار گاز CO₂ در آینده ایفا خواهد کرد [۵، ۱۵، ۲۰]. ون^۸ و همکارانش پتانسیل حفظ انرژی^۹ و کاهش انتشار گاز CO₂ در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را بر پایه مدل یکپارچه آسیا اقیانوسیه^{۱۰} (AIM) در صنعت فولاد چین ارزیابی کردند [۱۱]. آن‌ها نشان دادند که برای ذخیره انرژی و کاهش انتشارات گازها، ارتقای تکنولوژیکی، محرک مهم‌تری نسبت به تنظیم ساختاری محسوب می‌شود.



- | | | |
|----------------------|---|------------------------------------|
| 1- Arens | 5- Switching | 9- Energy conservation |
| 2- Ma | 6- Hasanbeigi | 10- Asian-Pacific Integrated Model |
| 3- Stock-based model | 7- Refined Logarithmic Mean Divisia Index | |
| 4- Cobenefits | 8- Wen | |



شکل ۱. چهار چوب مدل‌های تحلیل و بررسی جامع.

۲- متدولوژی

مدل ^۲ MFA دینامیک جهت پیش‌بینی تولید و مقدار قراضه فولادی در آینده مورد استفاده قرار گرفته است. توضیحات مختصری در رابطه با این مدل در بخش ۱-۲ ارائه شده است. در ادامه مدل مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 در بخش ۲-۲ معرفی شد تا مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 تخمین زده شود. در بخش ۲-۳ یک مدل تکنولوژیکی-اقتصادی جدید ارائه شد تا به صورت کمی، پتانسیل اقتصادی و ترمودینامیکی فرآیند EST را اندازه‌گیری کنند. در نهایت فاکتورهای تأثیرگذار با استفاده از مدل LMDI اندازه‌گیری شدند (۲-۴). این مدل‌های آنالیز، همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده اساساً باهم در ارتباطند.

۱-۲- تحلیل دینامیکی جریان مواد

MFA، به‌عنوان یک آنالیز ارزیابی سیستماتیک برای جریان و ذخایر مواد در یک سیستم زمانی و مکانی مورد استفاده قرار گرفته و یک ابزار مؤثر برای شناسایی و ارزیابی جریان مواد ورودی و خروجی در سیستم می‌باشد.

گرفته، تا فاکتورهای مؤثر بر مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 را تجزیه و تحلیل کند؛ همچنین اثر سیاست‌های مرتبط با انرژی را نیز مورد ارزیابی قرار دهد. در این تحقیق مزایای مصرف انرژی و انتشار گاز و مقرون بصره‌بودن اعمال و به‌کارگیری روش‌های EST، با استفاده از روش‌های بر پایه CSC مورد مطالعه قرار گرفتند.

متدولوژی در مقاله شامل اثرات هم‌افزایی تولید فولاد، ترویج و ارتقای تکنولوژی و تنظیم ساختاری به‌منظور بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش میزان انتشار گاز CO_2 و همچنین محرک‌های مربوط به این فاکتورها می‌باشد که می‌تواند به میزان بیشتری بر روی کشورها و صنایع انرژی بر^۱ (متمرکز از لحاظ انرژی)، اعمال شود.

به‌منظور یادآوری بیان می‌شود که این مقاله متشکل از بخش‌های زیر است: بخش ۲ به‌طور خلاصه متدولوژی مورد استفاده در این مطالعه را شرح می‌دهد. بخش ۳، جمع‌آوری اطلاعات، مفروضات اولیه و طراحی سناریوها را فراهم می‌کند. نتایج اصلی و بحث بر روی نتایج در بخش ۴ و ۵ ارائه شده است. در نهایت در بخش ۶ این مقاله جمع‌بندی شده است.

1- Energy-intensive

2- Dynamic material flow analysis

خروجی محصول (گیگا ژول به ازای هر تن محصول فرآیند= GJ/t^4) تعریف می‌شود. این شاخص بهره‌وری انرژی به‌طور قابل توجه و گسترده‌ای در صنایع مختلف برای اندازه‌گیری بهره‌وری انرژی هر فرآیند یا کل سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نکته نیز باید اشاره شود که شدت انرژی [۲۲] و شدت مصرف انرژی [۲۳] همان معنای SEC را دارند. به دنبال محاسبات مصرف انرژی، انتشار مخصوص گازهای^۵ (SCE) CO_2 (کیلوگرم کربن دی‌اکسید به ازای هر تن محصول فرآیند، CO_2 (t kg) نیز قابل اندازه‌گیری است.

۲-۲-۲- ESTها

ESTهای متعددی برای کاهش میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 در هر دو فرایند BF/BOF و EAF مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹]. این ESTها باید تصاعدی^۶ (رو به رشد و ترقی)، تضمین شده و قابل استفاده بوده و این امکان برای آنها فراهم باشد که به‌طور گسترده در صنعت فولاد هر کشور مورد استفاده قرار گیرند [۱۱]. در این مطالعه اثر ESTها بر روی مصرف انرژی و انتشار گازهای CO_2 در تولید فولاد مورد بحث قرار گرفت. مشخصه‌یابی در بخش ۳-۱ ارائه شده است.

۲-۲-۴- LMDI

در این مقاله به‌منظور بررسی توزیع فاکتورهای مختلف در پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و انتشار گاز CO_2 روش LMDI به کار گرفته شد. استفاده و رهنمودهای تجربی روش LMDI - که به‌طور گسترده در بخش‌های صنعتی مورد استفاده است - در تحقیقات قبلی ارائه شده است [۲۴، ۲۵]. در این مقاله به‌منظور بررسی کمی تأثیر فاکتورهای مختلف در اندازه‌گیری پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و انتشار گاز CO_2 از تحلیل و بررسی تجزیه LMDI اصلاح شده، استفاده شد. این فاکتورها در شکل‌گیری روند مصرف انرژی در بازه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ مؤثر است [۵]. این مطالعه شامل کل تولید فولاد خام، ساختار تولید، که بیانگر نسبت آهن اسفنجی در فرآیند EAF و سهم فولاد تولیدی از طریق EAF از کل فولاد تولیدی بوده و مطالعه روش‌های کاهش مصرف

MFA ایستا به‌عنوان یک مدل تحلیل و بررسی پر استفاده جهت ارزیابی جریان مواد مطابق با مرزهای فضایی و زمانی مورد نیاز، مطرح می‌باشد. MFA دینامیک که تحت عنوان MFA وابسته به زمان نیز شناخته می‌شود؛ یک روش رایج است که برای اندازه‌گیری جریان مواد حال حاضر و گذشته مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش یک متغیر زمانی معرفی کرده و این حقیقت را در نظر می‌گیرد که محصولات قراضه شده زمانی که به پایان عمر خود برسند از استفاده خارج می‌شوند. در این مدل مخزن شامل جریان حال حاضر و گذشته است تا روش منطقی‌تری را برای تخمین زدن (مقدار) قراضه پیدا کند و تغییرات زمانی را در جریان مواد دنبال نماید.

در این مطالعه MFA دینامیک اعمال شد تا تقاضای فولاد و منابع قراضه‌های فولادی را به‌طور هم‌زمان و دائم تخمین زده و پیش‌بینی کند؛ که این کار از طریق پیش‌بینی کثرت فولاد، طول عمر محصولات، پارامترهای اجتماعی و اقتصادی همچون تولید ناخالص داخلی^۱ (GDP) و جمعیت صورت می‌گیرد. مصرف فولاد در پایین‌دست^۲ بین پنج صنعت تقسیم می‌شود: ساخت‌وساز، خودرو (وسایل نقلیه)، ماشین‌آلات، لوازم و سایر مواد که در سال ۲۰۱۰ سه مورد اول تقریباً ۷۳.۴٪ از کل مصرف ظاهری فولاد را در جهان شامل می‌شدند.

۲-۲-۲- مدل مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2

با افزایش نگرانی‌ها در خصوص تغییرات اقلیمی، مصرف بالای انرژی و انتشار گاز CO_2 به یک مسئله مهم داخلی و بین‌المللی تبدیل شده است که این موضوع به دلیل وابستگی آنها به سوخت‌های فسیلی است. کاهش میزان مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 در صنعت آهن و فولاد به‌عنوان یک هدف بسیار ضروری در سطح جهان مطرح است بنابراین در نظر گرفتن یک مدل مناسب برای ارزیابی این دو فاکتور از اهمیت بالایی برخوردار است. یک مدل انرژی برای ارزیابی مصرف انرژی در صنعت آهن و فولاد بکار گرفته شده است. مصرف انرژی مخصوص (SEC)^۳ معمولاً به‌عنوان مقدار انرژی مصرف شده در واحد



1- Gross domestic product

2- Downstream

3- Specific energy consumption

4- GJ/t process product

5- Specific CO_2 emissions

6- Progressive



انرژی می باشد. در این مقاله تجزیه افزایشی^۱ انتخاب شد. تفاوت تغییرات، $\Delta E_{tot} = E^t - E^0$ و $\Delta C_{tot} = C^t - C^0$ تجزیه می شود تا مقادیر زیر را بدهد:

$$\Delta E_{tot} = \Delta E_{pdn} + \Delta E_{esh} + \Delta E_{PIr} + \Delta E_{tec} \quad (1)$$

$$\Delta C_{tot} = \Delta C_{pdn} + \Delta C_{esh} + \Delta C_{PIr} + \Delta C_{tec}, \quad (2)$$

که در اینجا E و ΔC به ترتیب بیانگر اثرات تخمین زده شده بر روی مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 است؛ pdn و PIR و tec به ترتیب بیانگر محصولات فولادی، سهم تولید فولاد از طریق روش EAF، نسبت آهن اسفنجی در فولادسازی به روش EAF و تکنولوژی ها می باشد. فرمول دقیق تر LMDI را می توان در تحقیقات قبلی پیدا کرد [۵]. نتایج تجزیه صنعت فولاد با استفاده از اطلاعات تاریخی در بازه بین سال های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۵ بررسی شد و علاوه بر این، بررسی و تحلیل تجزیه و برای دوره های پیش بینی ۲۰۱۵ - ۲۰۲۰، ۲۰۲۰ - ۲۰۳۰، ۲۰۳۰ - ۲۰۴۰، ۲۰۴۰ - ۲۰۵۰ با استفاده از اطلاعات پیش بینی انجام شد.

۳- جمع آوری داده، طراحی سناریو

۳-۱- جمع آوری داده

به منظور تکمیل به کارگیری مدل MFA دینامیک در صنعت تولید فولاد، ۵ بخش پایین دستی مصرف کننده فولاد، در این مطالعه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. داده های تاریخی از پژوهش های قبلی جمع آوری شد که شامل دسته بندی محصولات و سرانه موجودی ذخیره شده از محصولات است. اطلاعات دیگر از صنعت ساخت و ساز [۲۶-۲۸] و شرایط صنعت خودرو [۲۹-۳۱] از تحقیقات قبلی قابل برداشت است. در این مطالعه سرانه موجودی محصولات با استفاده از شاخص های اقتصادی همچون GDP، جمعیت، نرخ شهری شدن قابل اندازه گیری است و بر اساس داده های منطقی پیش بینی می شود.

آژانس های مرتبط و بخش های دولتی از جمله انجمن صنایع آهن و فولاد در کشورهای مختلف و دیوان ملی آمار و ارقام^۲ (NBS) مطالبی را در مورد مصرف انرژی در صنعت آهن و فولاد و فرایندهای زیرمجموعه آن منتشر کردند که دارای یک نقص در مورد اطلاعات دقیق و جامع است که باعث به وجود آمدن چند مشکل در ارزیابی بهره وری انرژی در سطح ملی می شود. (۱) تقریباً غیرممکن است که اطلاعات جزئی از شرکت های کوچک فولاد جمع آوری کرد؛ که معمولاً دارای تکنولوژی های تولیدی منسوخ هستند و بهره وری انرژی پایینی دارند. (۲) داده های فرایندهای جانبی که بسیار پیچیده هستند و در میان شرکت های مختلف تفاوت دارند، معمولاً در آمار در نظر گرفته نمی شوند. به منظور حل این مشکل ما بررسی هایی انجام گرفته، فاکتورهای اصلاح معرفی شد. فاکتورهای انتشار کربن سوخت ها به منظور اندازه گیری انتشار گاز CO_2 حاصل از مصرف انرژی، مورد استفاده قرار گرفت [۳۲].

فرض بر این است که فاکتور انتشار برای الکتریسیته در سال ۲۰۱۰ برابر با $۷۷ \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ (کیلوگرم گاز CO_2 به ازای هر کیلووات ساعت) باشد [۳۳]. با علم به این موضوع که بیشتر سوخت‌های فسیلی مورد استفاده در صنعت فولاد دنیا کک و زغال‌سنگ هستند، در این تحقیق از فاکتور انتشار گاز CO_2 میانگین برای مصرف کک و زغال‌سنگ در صنعت آهن و فولاد استفاده شد که فاکتور انتشار گاز CO_2 برای سوخت در این تحقیق تقریباً برابر با $۱۰۴/۴ \text{ kgCO}_2/\text{GJ}$ (کیلوگرم گاز CO_2 به ازای هر گیگا ژول) است. علاوه بر این فرض شد که فاکتورهای انتشار گاز CO_2



جدول ۳. پارامترهای توزیع

صنعت	طول عمر میانگین (سال)	α	β
ساخت و ساز	۳۰	۵	۳۱.۶۷
	۵۰	۵	۵۴.۷۴
	۶۰	۵	۶۵.۳۵
خودروهای سبک شخصی	۱۳	۴.۷۹	۱۴.۴۶
کامیونها	۹	۵.۵۸	۱۰.۰۹
اتوبوسها	۱۲	۵.۳۳	۱۳.۱۱
ماشین آلات	۱۵.۱۹	۵	۱۶.۵۴
وسایل و ابزار	۱۰.۸۹	۵	۱۰.۸۹
سایر موارد	۱۳	۵	۱۴.۱۶

حاصل از سوخت و الکتریسیته تا سال ۲۰۵۰ بی تغییر باقی خواهند ماند [۳۳، ۳۲].
شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی در جدول ۱ فهرست شدند. پس از محاسبه اولیه پارامترهای توزیع ویبول^۱ و مرجع [۳۴] اتخاذ شده و به ترتیب پارامتر شکل^۲ و پارامتر

جدول ۴. اطلاعات EST موجود در صنعت تولید فولاد.

No	Energy saving technologies	Typical energy saving (GJ/t)	Lifetime (year)	Current implementation rate (%)	CO ₂ abatements (kg CO ₂ /t)
<i>Coke making</i>					
T1	Coke dry quenching (CDQ)	0.37	20	85%	50.05
T2	Coal moisture control (CMC)	0.06	15	9%	16.32
<i>Sintering</i>					
T3	Heat recovery from sintering and sinter cooler	0.35	10	20%	73.83
T4		0.08	10	80%	1.48
T5	Increasing bed depth	0.18	10	70%	0.29
T6	Reduction of air leakage Low-temperature sintering tech.	0.35	10	60%	5.25
<i>Iron making - blast furnace</i>					
T7	Pulverized coal injection (130 kg/t)	0.70	20	40%	60.41
T8	Top-pressure recovery turbines (TRT)	0.12	15	83%	27.30
T9	Preheating of fuel and air for hot blast stove	0.25	20	5%	26.03
T10		0.01	20	94%	5.84
T11	Recovery of blast furnace gas ^a	0.18	20	1%	19.00
T12	Slag heat recovery ^a	0.39	20	0%	47.16
T13	Pulverized coke oven gas injection ^a Pulverized waste plastic injection ^a	0.10	20	3%	10.72
<i>Steelmaking - basic oxygen furnace (BOF)</i>					
T14	Recovery of BOF gas and sensible heat	0.12	10	40%	48.19
T15	Dry gas cleaning system (wet to dry)	0.14	15	20%	28.86
T16	Flue gas waste heat recovery	0.09	10	15%	19.24
T17	LT-PR of converter gas	0.69	15	20%	3.92
T18	Slag heat recovery ^a	0.06	20	5%	13.85
<i>Steelmaking - electric arc furnace (EAF)</i>					
T19	Scrap preheating	0.02	30	10%	4.69
T20	Optimization of power supply	0.01	30	15%	15.40
T21	Flue gas waste heat recovery	0.06	30	10%	7.71
T22	Foamy Slag Practices ^a	0.01	30	30%	1.52
<i>Casting and refining</i>					
T23	Continuous casting	0.39	20	75%	36.65
T24	Efficient ladle preheating	0.02	20	15%	0.53
<i>Hot rolling</i>					
T25	Integrated casting and rolling (strip casting) ^a	0.28	30	20%	34.93
T26		0.15	10	40%	46.50
T27	Recuperative or regenerative burner	0.28	10	80%	25.61
T28	Process control in hot strip mill	0.04	15	20%	2.95
T29	Waste heat recovery from cooling water Hot delivery and hot charging of casting billet	0.23	10	80%	33.48
<i>Cold rolling</i>					
T30	Heat recovery on the annealing line	0.11	10	55%	30.60
T31	Automated monitoring and targeting systems	0.20	10	55%	24.04
<i>General technologies</i>					
T32	Preventative maintenance	0.45	15	40%	49.19
T33	Energy monitoring and management	0.12	10	50%	36.44
T34	systems	0.38	20	90%	77.99
T35	Cogeneration	0.51	15	15%	54.61
	Combined cycle power plant-CGPP				

- 1- Business-as-usual
- 2- Structure adjustment (STA)
- 3- Energy-efficiency improvement
- 4- Strengthened policy

مقایس^۳ در توزیع ویبول هستند، که در آن هم هاو^۴ و همکارانش سوابق از کار افتادگی ۷۰۲۴ خودرو را جمع آوری کردند و مدت عمر هر دسته را اندازه گیری نمودند.

۲-۳- تعریف سناریوها

طراحی صورت گرفته برای سناریوها، بازه زمانی بین ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ را شامل می شود. سال ۲۰۱۵ به عنوان سال پایه و شروع در نظر گرفته شد. ۴ سناریو تعریف شده در این مقاله شامل بیزینس معمولی (طبق معمول)^۱ (BAU)، سناریو تنظیم ساختار^۲ (STA)، سناریو بهبود بهره وری انرژی^۳ (EEI)

و سیاست تقویت شده^۴ (STP) بودند که در جدول ۵ فهرست شدند. چهار سناریو فوق الذکر در این بخش تعریف می شوند. در سناریوی BAU استمرار روند حاضر در صنعت تولید فولاد اتفاق خواهد افتاد. بنابراین در این سناریو، ساختار تولید که بیانگر نسبت آهن اسفنجی تغذیه شده به فرآیند EAF و سهم فرایند EAF در فولادسازی است، در همان سطح سال ۲۰۱۵ باقی خواهد ماند و نرخ اعمال فرآیندهای EST برای دوره زمانی بین سال های ۲۰۱۰ الی ۲۰۳۰ و ۲۰۳۰ الی ۲۰۵۰ به ترتیب به اندازه ۱٪ و ۲٪ افزایش خواهد

جدول ۵. مقادیر محدودیت ساختار محصول تحت چهار سناریو مختلف.

نسبت آهن اسفنجی در فولادسازی به روش EAF					سهم تولید فولاد به روش EAF				نرخ اجرای ESTها		
سال	BAU	STA	EEI	STP	BAU	STA	EEI	STP	BAU STA	EEI	STP
۲۰۱۵	۶۲.۸٪	۶۲.۸٪	۶۲.۸٪	۶۲.۸٪	۴.۲٪	۴.۲٪	۴.۲٪	۴.۲٪	افزایش سالانه ۱ و ۲ درصد به ترتیب در بازه سال های ۲۰۱۵-۲۰۳۰ و ۲۰۳۰-۲۰۵۰	افزایش سالانه ۳ و ۴ درصد به ترتیب در بازه سال های ۲۰۱۵-۲۰۳۰ و ۲۰۳۰-۲۰۵۰	افزایش سالانه ۴ و ۵ درصد به ترتیب در بازه سال های ۲۰۱۵-۲۰۳۰ و ۲۰۳۰-۲۰۵۰
۲۰۲۰	۶۲.۸٪	۵۵.۳٪	۶۲.۸٪	۵۳.۸٪	۱۰.۰٪	۱۵.۰٪	۱۰.۰٪	۱۸٪			
۲۰۳۰	۶۲.۸٪	۴۰.۲٪	۶۲.۸٪	۳۵.۹٪	۱۰.۰٪	۲۰.۰٪	۱۰.۰٪	۲۵٪			
۲۰۴۰	۶۲.۸٪	۲۵.۱٪	۶۲.۸٪	۱۸.۰٪	۱۰.۰٪	۲۵.۰٪	۱۰.۰٪	۳۵٪			
۲۰۵۰	۶۲.۸٪	۱۰.۰٪	۶۲.۸٪	۰	۱۰.۰٪	۳۰.۰٪	۱۰.۰٪	۴۵٪			
توجه: نسبت آهن اسفنجی در فولادسازی به طریق فرآیند EAF و سهم EAF از فولاد تولید شده در سال ۲۰۱۵ به دست آمده است.											



جدول ۶. مقایسه تقاضای فولاد واقعی و مقدار پیش‌بینی شده

سال	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵
مقدار واقعی (Mt)	۶۱۱	۶۶۷	۷۷۰	۷۷۱	۷۳۹	۷۰۰
مقدار پیش‌بینی شده (Mt)	۶۰۵	۶۵۷	۶۸۵	۷۸۹	۷۳۸	۷۰۲

میلیون تن در سال ۲۰۴۳ کاهش خواهد یافت و در نهایت در محدوده ۴۵۰ میلیون تن پایدار و تثبیت خواهد شد. تقاضای فولاد در بخش ساخت‌وساز که روند مصرف کلی فولاد را تعیین می‌کند، از ۲۹۸/۱۹ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ به ۳۹۲/۴۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۳ افزایش خواهد یافت و در ادامه به‌طور تدریجی تا ۱۹۷/۲۴ میلیون تن در سال ۲۰۵۰ کاهش خواهد یافت. پیک تقاضای فولاد در بخش خودرو با بقیه تفاوت می‌کند. با توسعه اقتصادی، سهم خودرو از مقدار ۸۰ میلیون تن در سال ۲۰۲۶ و از مقدار ۳۴/۰۳ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ کاهش نخواهد یافت؛ پیش‌بینی شده است که سهم خودرو در سال ۲۰۵۰ در محدوده ۶۱/۵۰ میلیون تن باشد. جدول ۶ مقایسه‌ای از مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر حقیقی تقاضای فولاد در شش سال گذشته را بر طبق مدل نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده، یک مقدار محدوده خطای قابل قبولی را نشان می‌دهند.

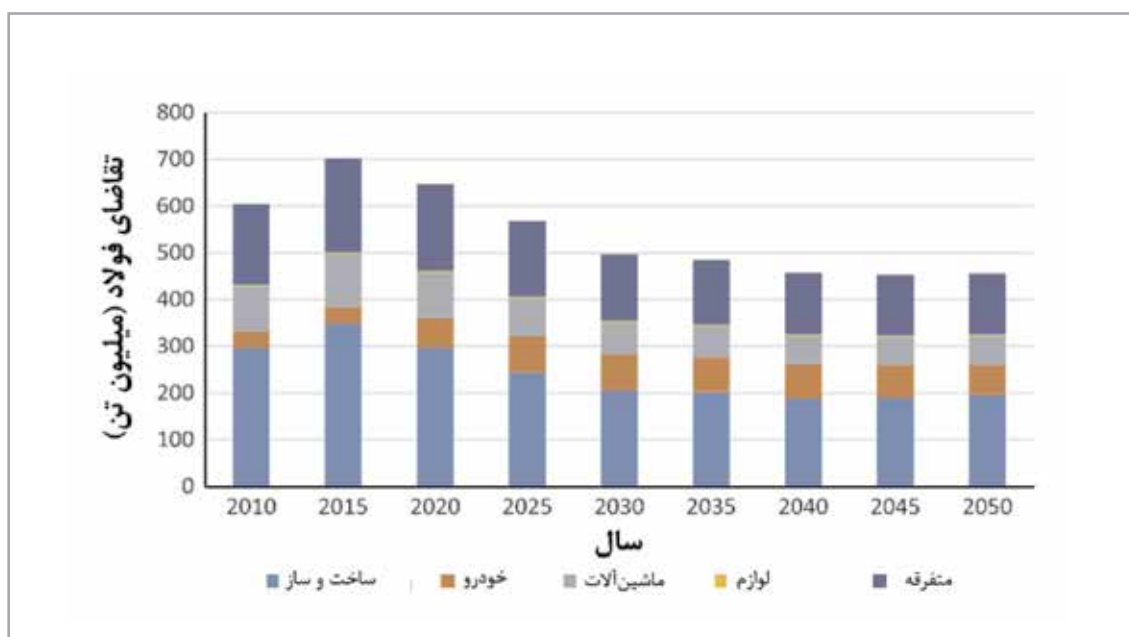
به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده فولاد، طول عمر در بخش ساخت‌وساز تأثیر بسیار مهمی بر روی تقاضای فولاد دارد. با این حال طول عمر حقیقی قطعات فولادی - که پس

یافت. در سناریوی STA نسبت آهن اسفنجی مورد استفاده به‌عنوان مواد اولیه (تغذیه) در EAF و سهم تولید فولاد از طریق EAF مطابق با جدول ۵ تنظیم شده است. تحت این سناریو نرخ اجرای فرایندهای EST همانند سناریوی BAU است. در مقایسه با سناریو BAU، سناریو EEI نرخ اجرای بزرگ‌تری در فرایندهای EST دارد. نرخ اجرای فرایندهای EST در دوره زمانی ۲۰۱۰ الی ۲۰۳۰ و ۲۰۳۰ الی ۲۰۵۰ به ترتیب به اندازه ۳٪ و ۴٪ افزایش خواهد یافت. در نهایت STP، به‌عنوان سناریو کارآمدی انرژی، با هدف ارزیابی پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات گاز CO₂، اثر تنظیم تولید و فرایندهای EST را با ادغام می‌کند.

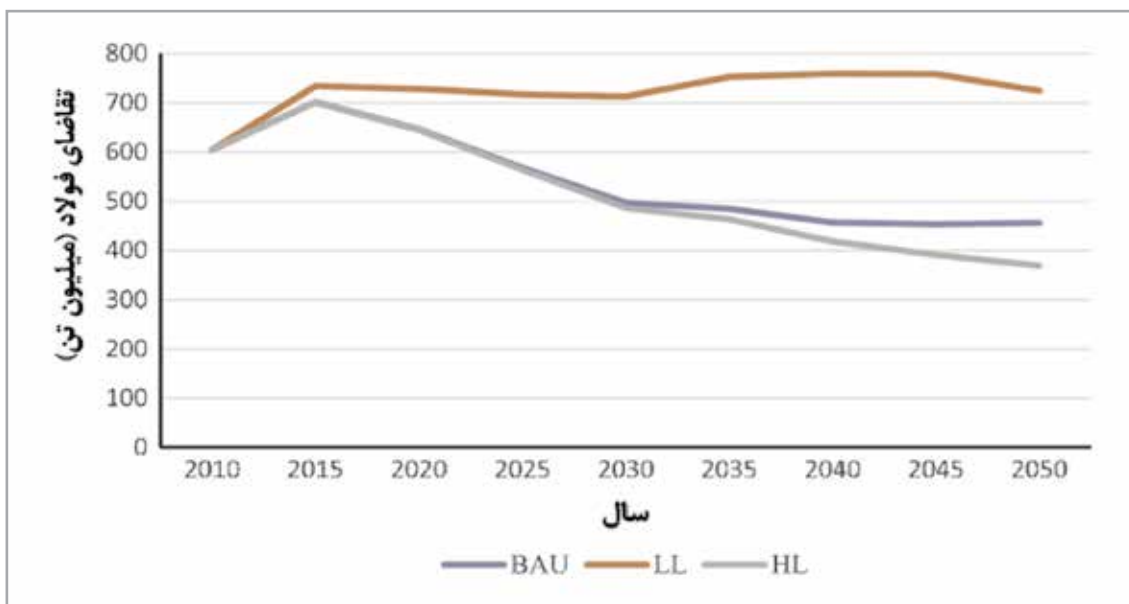
۴- نتایج

۴-۱- روند آینده در تولید فولاد و مقدار قراضه

تعدادی از متغیرها همچون توسعه اقتصادی، جمعیت و طول عمر نقش بسیار مهمی را در مصرف فولاد ایفا می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است تحت سناریوی BAU، تقاضای فولاد از ۶۰۴/۶۴ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ تقریباً به ۷۸۹/۳۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۳ افزایش خواهد یافت و سپس به تدریج به مقدار ۴۴۰/۳۸



شکل ۲. پیش‌بینی تقاضای فولاد در هر بخش از سال ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.



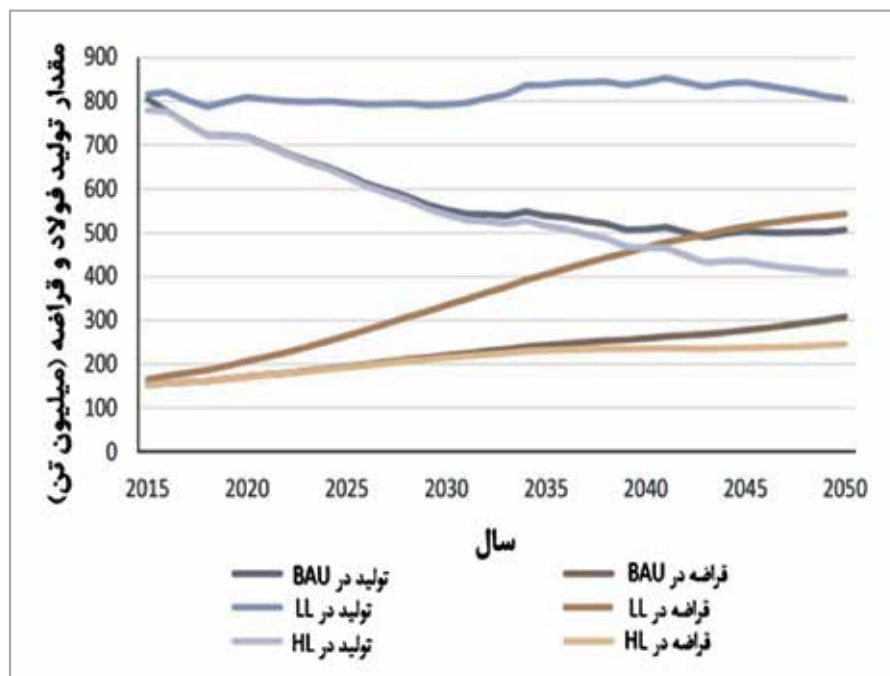
شکل ۳. تقاضای فولاد تحت سناریوهایی با طول عمر مختلف در دوره های زمانی مختلف تا سال ۲۰۵۰ میلادی.

طول عمر به ترتیب برابر ۳۰ و ۶۰ سال است و در سناریوهای با طول عمر کم^۲ (LL) طول عمر تا انتها برابر ۳۰ سال باقی می ماند.

همان طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، طول عمر در ساخت و ساز تأثیر کوچکی بر روی زمان پیک تقاضای فولاد دارد. با این حال اثر آن بر روی روند آینده حیاتی است. در مقایسه با سناریوی BAU هنگامی که طول عمر سازه ۳۰ سال باقی بماند سناریوی (LL)، تقاضای فولاد به آرامی کاهش خواهد یافت و تقریباً در سال ۲۰۲۰

از آن خراب و از کار افتاده محسوب می شوند- معمولاً بسیار کمتر از عمر طول عمر طراحی آن هاست که معمولاً این مقدار در اکثر کشورها بیش از ۵۰ سال می باشد. ناگفته نماند که طول عمر از کار افتادگی کامل و تخریب قطعات فولادی در کشور انگلستان برابر یک سوم این میزان در کشور چین است. دو سناریو دیگر به منظور مقایسه با BAU طراحی شده اند. در سناریو BAU، طول عمر سازه قبل از سال ۱۹۹۰ برابر ۳۰ سال بود پس از سال ۲۰۰۰ مقدار طول عمر به تدریج تا ۵۰ سال افزایش پیدا کرد. در سناریوهایی با طول عمر بالا^۱ (HL)،



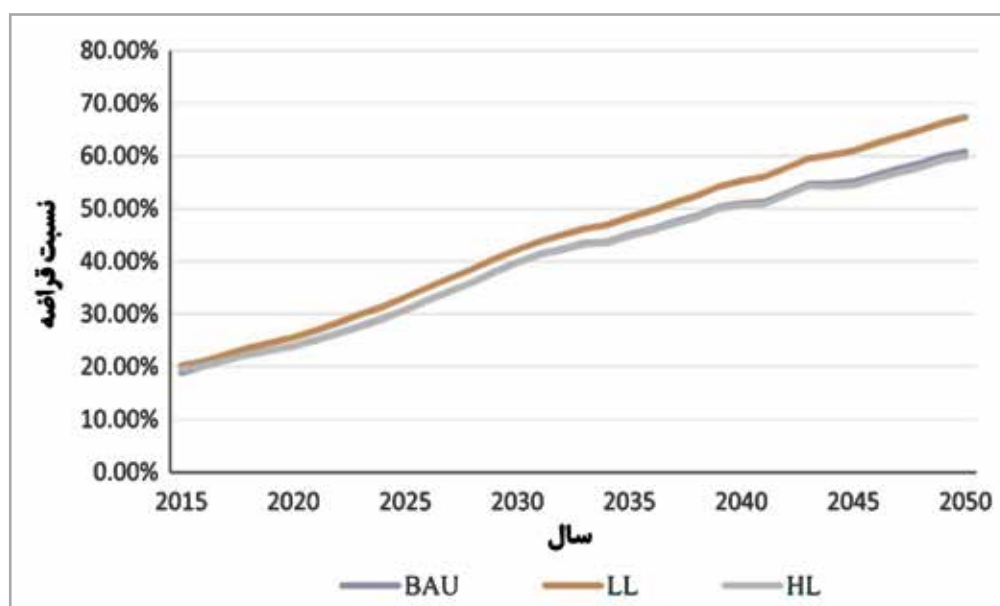


شکل ۴. مقایسه تولید فولاد و قراضه تحت ۳ سناریو تا سال ۲۰۵۰ میلادی.

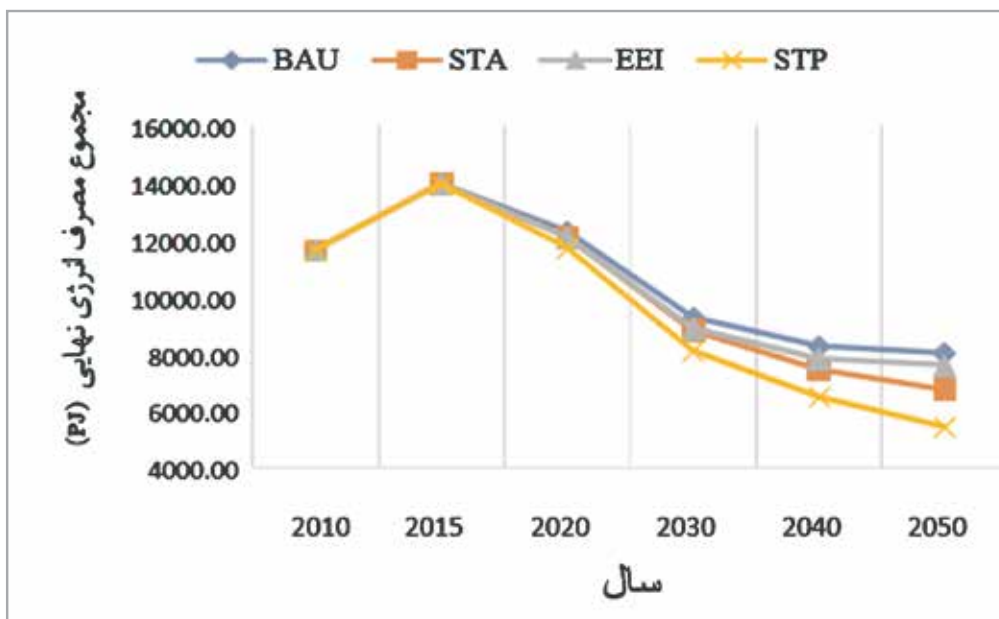
حیاتی را در کاهش مصرف بیش از حد بالای فولاد دارد.

شکل ۴ مقایسه‌ای از تولید فولاد و قراضه را تحت ۳ سناریو نشان می‌دهد. تحت تمامی سناریوها و در دوره زمانی مدل‌سازی، منابع قراضه در دسترس به‌طور پیوسته افزایش خواهد یافت؛ این افزایش به دلیل رشد شدید کشورها بخصوص چین در دهه اول قرن بیست و یکم است. مقدار قراضه از ۱۷۴/۸۷ میلیون تن در سال ۲۰۱۵ به ۴۲۸/۸۵ میلیون تن در سال ۲۰۵۰ خواهد می‌رسد، که

مقدار ۷۳۰ میلیون تن تثبیت می‌شود؛ این زمان ۲۳ سال زودتر از همین مورد در BAU است. تقاضای فولاد به اندازه کافی کاهش نخواهد یافت و در مقادیر بالا باقی خواهد ماند که نتیجه آن هدر رفتن مقادیر زیادی مواد و انرژی می‌باشد. در طرف مقابل به‌طور برعکس، تحت HL مصرف فولاد پس از پیک به سرعت و به‌طور پیوسته کاهش خواهد یافت و هیچ ثبات و پایداری را محدوده زمانی مدل‌سازی نشان نمی‌دهد، تا زمانی که به مقدار ۳۷۰ میلیون تن در سال ۲۰۵۰ می‌رسد. بنابراین طول عمر ساخت‌وساز، نقش



شکل ۵. پیش‌بینی نسبت قراضه تحت سه سناریو تا سال ۲۰۵۰ میلادی.



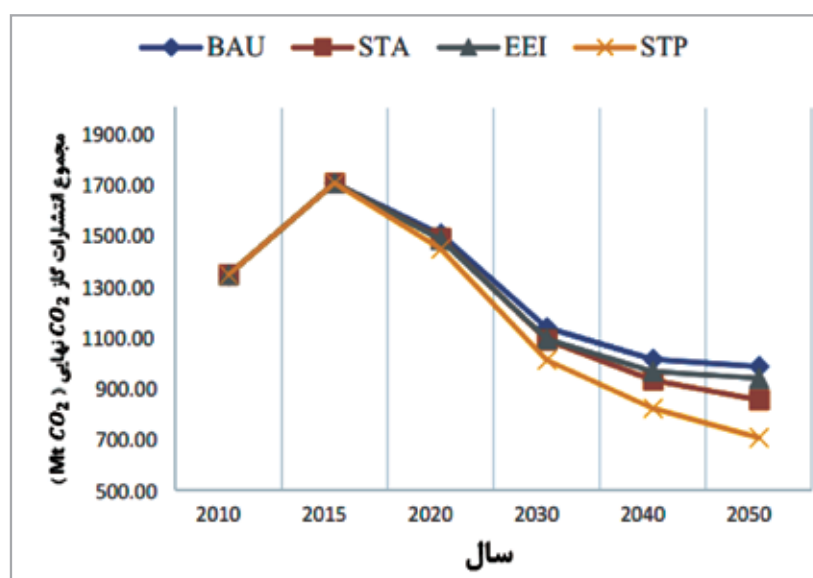
شکل ۶. مجموع مصرف انرژی نهایی برای صنعت تولید فولاد تحت سناریوهای مختلف در بازه ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.

۴-۲- مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂

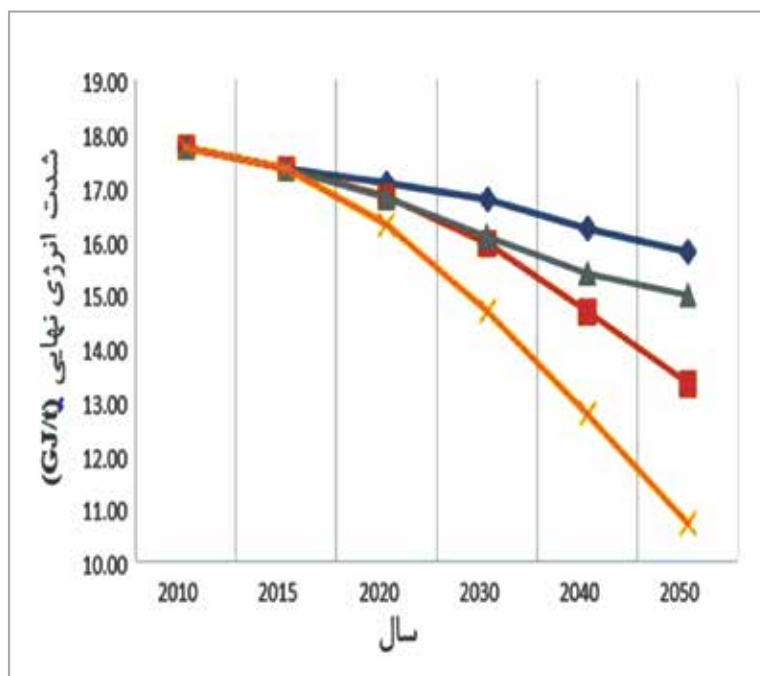
شکل ۶ و شکل ۷ روند کاهشی مجموع مصرف انرژی نهایی و مجموع انتشار گازهای CO₂ نهایی را تحت تمامی ۴ سناریو نشان می‌دهد. بهبود فرمولاسیون ساختار و بهره‌وری انرژی هر دو منجر به تأثیر منفی بر روی مصرف انرژی و انتشار گازهای CO₂ می‌شود.

شکل ۶ نتایج مصرف کلی انرژی (TEC) را تحت تمامی ۴ سناریو در بازه بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰ نمایش می‌دهد. مقدار کاهش عمدتاً به دلیل کاهش میزان تولید فولاد است. از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ مصرف انرژی از مقدار ۷۵۸۵/۶۴ PJ، ۶۷۴۴/۱۹ PJ، ۷۹۹۰/۱۲ PJ به ۱۳۹۳۱/PJ۳۸

این مقدار اندکی بیشتر از HL است. قراضه در LL با سرعت بیشتر افزایش خواهد یافت. از آنجایی که محصولات فولادی بسیار زودتر مستهلک می‌شوند، این موضوع به‌عنوان یک روند ثبات و پایدار در انتهای دوره مدل‌سازی پدیدار می‌شود. ضمناً، همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، با رشد منفی تولید، نسبت قراضه به‌طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. تحت سناریو BAU این افزایش از مقدار ۱۸/۹٪ در سال ۲۰۱۵ به مقدار ۶۶٪ در سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت، که مشابه همین موضوع در دو سناریو دیگر می‌باشد.



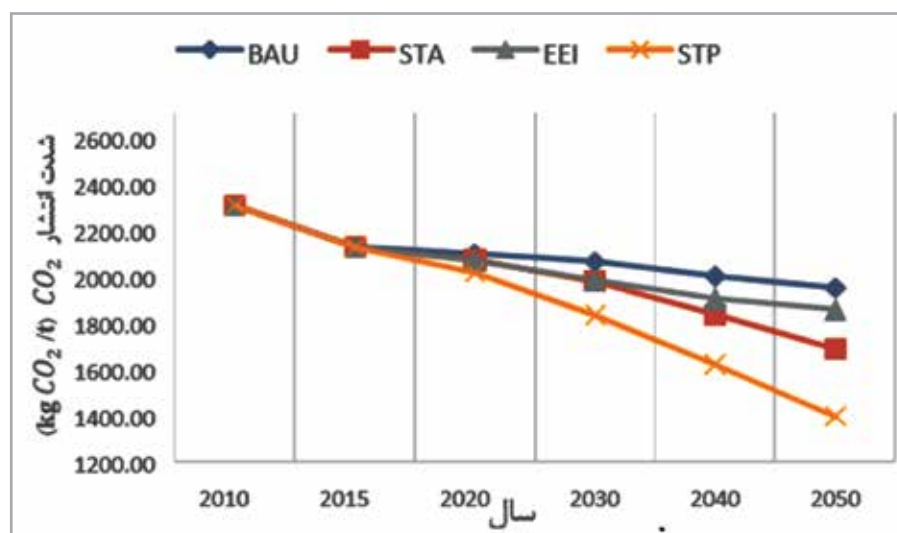
شکل ۷. مجموع انتشارات گاز CO₂ نهایی برای صنعت تولید فولاد تحت سناریوهای مختلف در بازه ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.



شکل ۸. شدت انرژی نهایی مربوط به صنعت تولید فولاد در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.

تحت سناریوهای STA و EEI، به ترتیب ساختار تولید فولاد و نرخ محبوبیت فرآیندهای EST تقویت می‌شود و مصرف کل انرژی و مقدار نهایی انتشار گاز CO₂ به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. تحت سناریو STP، روند کاهشی به‌طور هم‌زمان با کاهش تولید فولاد خام، تنظیم ساختار و نرخ محبوبیت فرآیندهای EST تقویت شد. در کل، افزایش سهم فرآیند EAF از کل فولاد تولیدی و به کارگیری و اجرای بیشتر فرآیندهای EST، نقش بسزایی در کاهش قابل توجه در کل انرژی مصرفی و کاهش انتشار گاز CO₂ دارد [۵، ۳۵]. همچنین روند کاهشی فولاد خام پس از ۲۰۱۵ مطابق با پیش‌بینی‌های محققین سایر صنایع است [۲۰، ۳۶].

و PJ ۵۴۲۶ / ۱۳ به ترتیب برای سناریوهای STA، BAU، EEI و STP کاهش می‌یابد. در مقایسه با سناریوی BAU، سه سناریو دیگر مصرف انرژی کمتری را نمایش می‌دهند. مجموع انرژی نهایی مورد استفاده برای تمامی سناریوها پیکمی در بازه ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ دارند. همان‌طور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، انتشارات گاز CO₂ مربوط به صنعت فولاد از ۱۷۰۴/۸۷ میلیون تن به ۹۸۵/۶۳ میلیون تن، ۸۵۳/۵۷ میلیون تن، ۹۳۸/۹۹ میلیون تن و ۷۰۶/۸۷ میلیون تن به ترتیب برای سناریوهای EEI، STA، BAU و STP در بازه بین سال‌های ۲۰۱۵ الی ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد.



شکل ۹. شدت انتشار نهایی گازهای CO₂ مربوط به صنعت تولید فولاد در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۵۰.

۱-۲-۴- شدت انرژی و شدت CO₂

شکل ۸ و شکل ۹ کاهش پتانسیل شدت انرژی و شدت گاز CO₂ در صنعت فولاد را تحت سناریو BAU و ۳ سناریو دیگر نشان می‌دهد. روند کاهشی در شدت انرژی و شدت گاز CO₂ برای تمامی سناریوها لیست شده‌اند که این روند کاهشی متأثر از تولید فولاد خام، نسبت آهن اسفنجی در EAF، سهم فولاد تولیدی به روش EAF نسبت به کل فولاد تولیدی و نرخ محبوب شدن فرآیندهای EST است. سناریو BAU گرایش کاهشی را بدون الزامات سناریوها در شدت انرژی و شدت گاز CO₂ نشان می‌دهد.

در نرخ محبوب‌سازی فرایند EST تأمین می‌شود. شدت گاز CO₂ در سال ۲۰۱۵ از ۹۵/۲۱۲ kg CO₂/t به مقدار ۱۹۴۵/۲۳ kg CO₂/t، ۱۶۸۴/۶۱ kg CO₂/t و ۱۸۵۳/۱۸ kg CO₂/t به ترتیب تحت سناریوهای EAF، STA، BAU و STP کاهش می‌یابد. در مقایسه با سناریو BAU، سه سناریوی دیگر کاهش قابل توجهی را در شدت انرژی و شدت CO₂ نشان می‌دهد که در میان آن‌ها سناریو STP کمترین مقدار را نشان می‌دهد. اشاره به این نکته ضروری است که روند شدت انرژی و شدت گاز CO₂ بین سال‌های ۲۰۱۵ الی ۲۰۵۰ در مطابقت با تحقیقات قبلی است [۳۷، ۲۰].

۲-۲-۴- پتانسیل کاهش مصرف انرژی و انتشارات گاز CO₂

پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش میزان انتشار گاز CO₂ در صنعت فولاد و تحت سناریوهای EAF، STA و STP مورد مقایسه با سناریوی BAU قرار گرفت و در جدول ۷ ارائه شد. این پتانسیل به‌صورت گام‌به‌گام با کاهش نسبت آهن اسفنجی در فرآیند EAF افزایش می‌یابد، که باعث افزایش سهم تولید فولاد تولیدی از طریق فرایند EAF و

تحت سناریو BAU شدت انرژی از ۱۷/۷۲ GJ/t^۱ در سال ۲۰۱۰ به ۱۵/۷۷ GJ/t در سال ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد. سه سناریوی دیگر مقادیر شدت انرژی کمتری را تخمین زده‌اند. سهم بیشتری از تولید فولاد به روش EAF از کل فولاد تولیدی و نسبت آهن اسفنجی کمتر در تولید فولاد به روش EAF در سناریو STA منجر به کاهش شدت انرژی در سراسر طول دوره‌های زمانی مدل‌سازی می‌شود. در سناریوهای EAF و STP میزان بهره‌وری انرژی از طریق بهبود



۱- کیگا ژول به ازای هر تن

۲- کیلوگرم گاز کربن دی اکسید به ازای هر تن

جدول ۷. پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازهای CO₂ در صنعت فولاد در مقایسه با سناریو BAU.

نوع پتانسیل	STA				EEI				STP			
	۲۰۲۰	۲۰۳۰	۲۰۴۰	۲۰۵۰	۲۰۲۰	۲۰۳۰	۲۰۴۰	۲۰۵۰	۲۰۲۰	۲۰۳۰	۲۰۴۰	۲۰۵۰
صرفه‌جویی انرژی (PJ در سال)	۱۸۳.۳	۴۵۲.۸	۷۸۸.۴	۱۲۴۵.۹	۱۹۲.۲	۳۸۲.۵	۴۱۹.۳	۴۰۴.۵	۵۵۰.۷	۱۱۵۱.۵	۱۷۵۷.۳	۲۵۶۴.۰
کاهش انتشار گاز CO ₂ (Mt در سال)	۱۸.۱	۴۶.۶	۸۲.۸	۱۳۲.۱	۲۲.۳	۴۴.۱	۴۸.۵	۴۶.۶	۵۷.۹	۱۲۶.۳	۱۹۲.۱	۲۷۸.۸

کاهش CO₂ برای سناریو EEI برابر با ۲۲/۳، ۴۴/۱، ۴۸/۵ و ۱۳۲/۱ میلیون تن گاز CO₂ و برای سناریو STP برابر با ۲۷۸/۸، ۱۹۲/۱، ۱۲۶/۳، ۵۷/۹ میلیون تن گاز CO₂ می‌باشد، جایی‌که پتانسیل کاهش انتشار گازهای CO₂ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب برابر با ۱۲/۵٪، ۴۰٪، ۲۳/۴٪ از TCE است. حتی پتانسیل کاهش انتشار گازهای CO₂ به مقدار ۳۹/۴٪ از مقدار گازهای CO₂ انتشار یافته در سال ۲۰۵۰ می‌رسد.

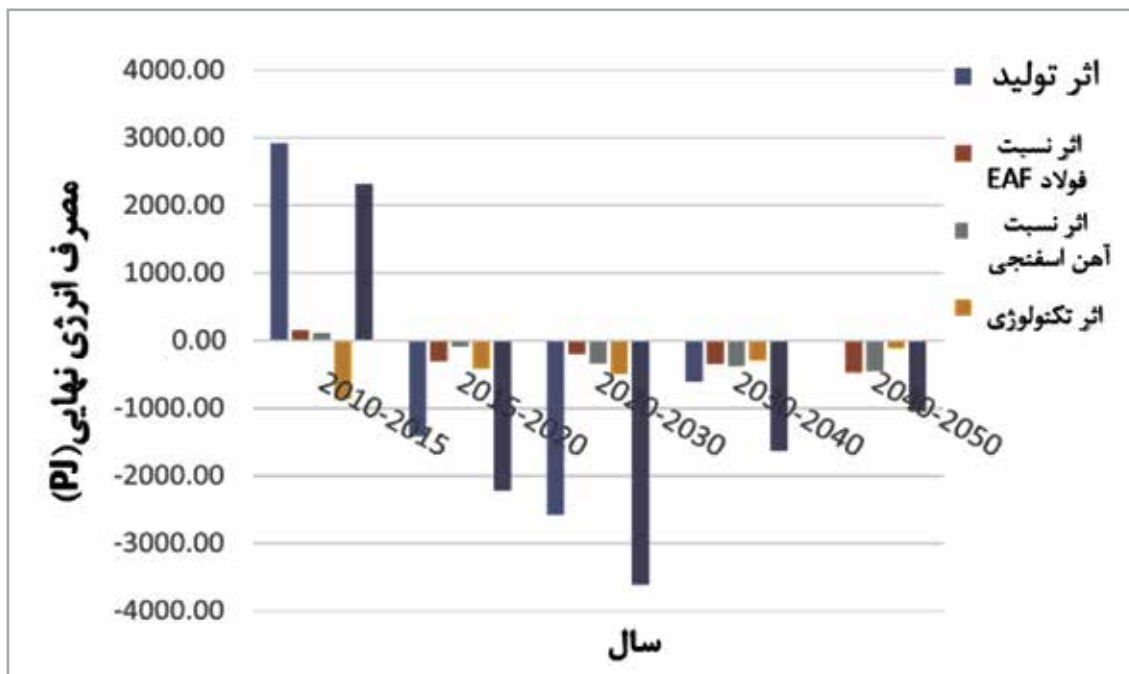
۳-۲-۴- تجزیه فاکتورها

به‌منظور تحلیل و بررسی میزان مشارکت و سهم فاکتورهای مختلف در پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گاز CO₂ روش LMDI برای سناریو STP به کار گرفته شد، تا اثرات این فاکتورها را بر پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گاز CO₂ در این مقاله اندازه‌گیری کند؛ این

افزایش محبوبیت فرآیندهای EST می‌شود. تحت سناریو STA، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی نسبت به سال ۲۰۱۵ تقریباً برابر با ۱/۵٪، ۴/۹٪، ۹/۶٪ و ۱۵/۶٪ از مصرف انرژی پیش‌بینی شده به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ است. تحت سناریوی EEI پتانسیل انرژی به اندازه ۱/۶٪، ۳/۴٪، ۵/۴٪ و ۵/۳٪ از مصرف سالانه انرژی به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد. همچنین تحت سناریو STP، به دلیل ترکیبی از تنظیم ساختاری و بهبود تکنولوژی صورت گرفته، پتانسیل کاهش شدت انرژی، بیشینه مقدار خواهد بود. در این سناریو صرفه‌جویی انرژی در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب برابر با ۴/۷٪، ۱۴/۲٪، ۲۷/۱٪ خواهد بود. در سناریو STP، پتانسیل‌های کاهش در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب برابر است با ۱۸/۱، ۴۶/۶، ۸۲/۸ و ۱۳۲/۱ میلیون تن گاز CO₂ است. پتانسیل



1- MtCO₂



شکل ۱۰. نتایج تجزیه و تحلیل انرژی نهایی مورد استفاده در صنعت فولاد تحت سناریو STP.

مانده و انرژی نهایی مورد استفاده افزایش یافته است. در طی این دوره زمانی به دلیل افزایش در تولید فولاد خام، مصرف انرژی نهایی به اندازه ۲۹۲۰/۳۰ پتاژول^۱ افزایش می‌یابد. با این حال، به دلیل کاهش در انرژی مصرفی نهایی در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰، اثرات تولید منفی می‌شود؛ زیرا پیش‌بینی ما از تولید فولاد کاهش را در طی این دوره نشان می‌دهد. تأثیر تولید فولاد خام در طی سال‌های ۲۰۴۰ تا ۲۰۵۰، به دلیل تغییرات بسیار جزئی، بسیار کوچک است. تنظیمات ساختاری، انرژی مصرفی نهایی را در طی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۰، ۲۰۲۰-۲۰۳۰، ۲۰۳۰-۲۰۴۰ و ۲۰۴۰-۲۰۵۰ به ترتیب به ۳۹۸/۷۴، ۵۳۶/۴۹، ۷۳۱/۱۰ و ۹۲۲/۲۳ پتاژول کاهش می‌دهد.

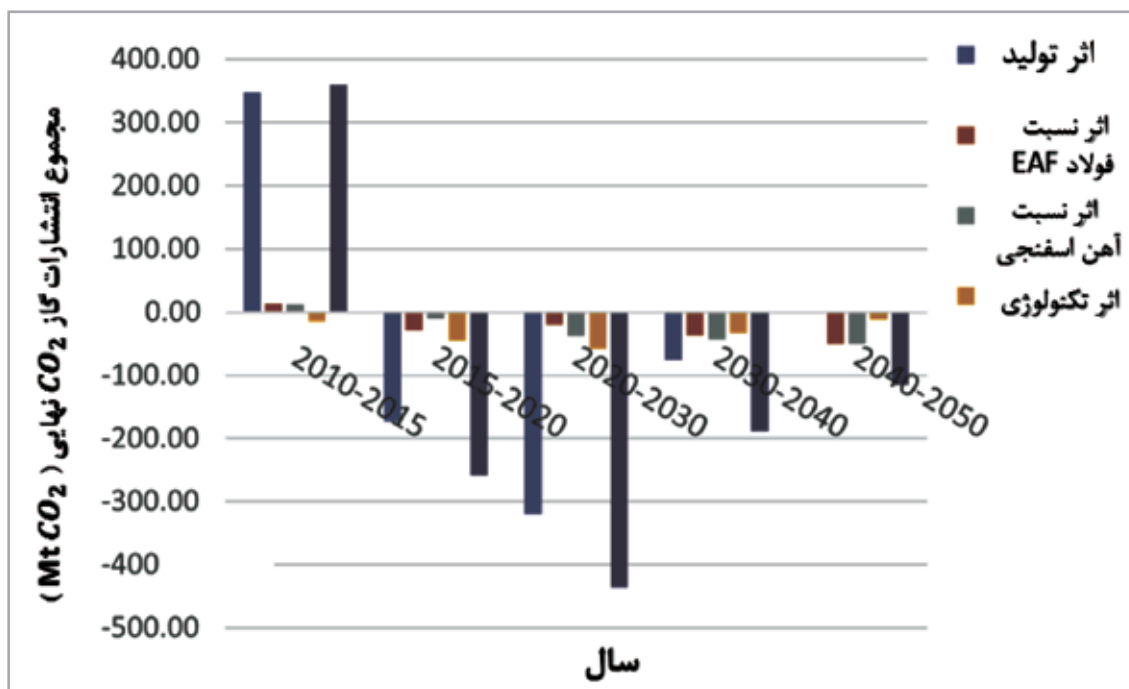
علاوه بر این ترویج و ارتقای تکنولوژی، انرژی نهایی مورد استفاده را به ترتیب به اندازه ۴۱۲/۹۳، ۴۹۴/۶۱، ۲۹۰/۱۵ و ۱۱۱/۳۸ در طی همان دوره‌های زمانی کاهش می‌دهد.

فاکتور شامل تولید فولاد، سهم فولاد تولیدی از روش EAF از کل فولاد تولیدی، نسبت آهن اسفنجی در EAF و ESها است.

نتایج در جدول ۷ نشان می‌دهد که پتانسیل صرفه‌جویی انرژی به تدریج با تنظیم ساختار تولید و ترویج فرآیندهای EST به تدریج افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن این سناریوها به نمایندگی از آن‌ها ما تنها سناریو STP را به تفصیل مورد بررسی قرار دادیم.

شکل ۱۰ نتایج تجزیه مصرف انرژی نهایی را در صنعت فولاد نشان می‌دهد. این شکل نتایج مربوط به پتانسیل انرژی نهایی را با استفاده از به کارگیری تجزیه LMDI را برای پنج دوره ۲۰۱۰-۲۰۱۵، ۲۰۱۵-۲۰۲۰، ۲۰۲۰-۲۰۳۰، ۲۰۳۰-۲۰۴۰ و ۲۰۴۰-۲۰۵۰ فهرست کرده است. نیروی محرکه جهت تغییرات در انرژی نهایی مورد استفاده در طی بازه‌های زمانی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در بازه سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ اثرات تولید، مثبت باقی





شکل ۱۱. نتایج تجزیه و تحلیل انتشار کلی CO₂ در صنعت فولاد تحت سناریو STP.

گازهای CO₂ در صنعت فولاد به شدت به توسعه و بهبود تکنولوژی وابسته است. با این حال در بلندمدت، تنظیم ساختار صنعت می تواند تا سال ۲۰۳۰، انتشار گازهای CO₂ را به مقدار بیشتری کاهش دهد.

۵- بحث و پیشنهادها

این مطالعه یک مدل پیش بینی دقیق و جامع را با استفاده از آنالیز جریان مواد (MFA) فراهم می کند که این مدل شامل پیش بینی مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ در صنعت فولاد است. در این بخش شرایط استفاده از قراضه های فولادی و فاکتورهای مصرف انرژی و انتشارات گاز CO₂ و تکنولوژی ها از دیدگاه ترمودینامیکی و اقتصادی و بر پایه آنالیز شدت و حساسیت بحث شده است. در ادامه، پیشنهادها و محدودیت های تحقیق ارائه شده است.

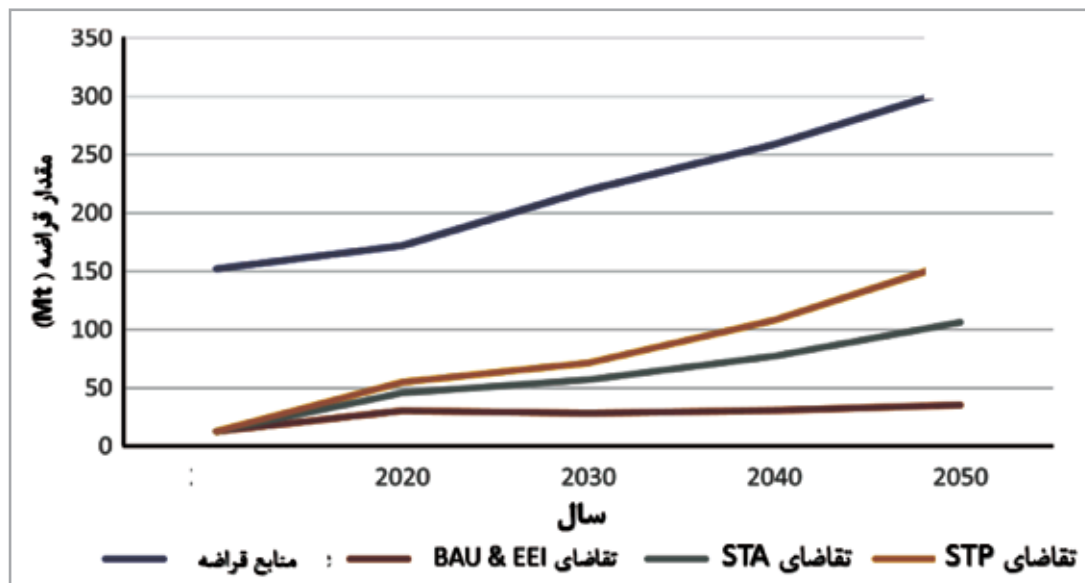
۵-۱- منابع قراضه و تنظیم ساختار

تولید فولاد به طور مستقیم مقدار مصرف انرژی و انتشارات کربن را تعیین می کند؛ بنابراین منجر به اندازه گیری پتانسیل کاهش این فاکتورها می گردد. ممکن است که تحقیقات قبلی در مورد تقاضای فولاد و مصرف آن در دنیا بیش برآورد^۱ (اغراق) کردند؛ که این موضوع منجر به اغراق و برآورد بیش از حد واقعی منابع مصرفی و انتشار گاز CO₂ می شود. این مطالعات معمولاً پیش بینی می کنند که پیک تقاضای فولاد در بین سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ پدیدار خواهد شد [۴، ۳۷-۴۰]، که این زمان قبل

اثرات ساختاری، یک افزایش تدریجی را در طی سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ به دلیل افزایش سهم تولید فولاد حاصل از فرایند EAF نسبت به کل فولاد تولیدی و افزایش نسبت آهن اسفنجی در تولید فولاد با استفاده از فرایند EAF، نشان می دهد. قبل از سال ۲۰۲۰، محبوبیت فرآیندهای EST یک فاکتور منع کننده بزرگ تر بنام مصرف انرژی دارد. اگرچه ساختار، اثرات بسیار مهم بر روی صرفه جویی انرژی دارد، اما اثر آن در طی این دوره زمانی قابل توجه نیست. نتیجه گیری می شود که پس از سال ۲۰۲۰ ساختار صنعت فولاد دنیا باید الزاماً به هدف مصرف انرژی در بلندمدت دست یابد.

همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، مشابه با پتانسیل صرفه جویی انرژی، تولید فولاد خام، EST ها و تأثیرات ساختاری نیز نقش بسیار مهمی در کنترل نمودن انتشارات گاز CO₂ در بازه سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ دارند. قبل از سال ۲۰۳۰، اثرات تکنولوژیکی در صنعت فولاد به مقدار بیشتری نسبت به اثرات ساختاری از انتشار گازهای CO₂ ممانعت به عمل خواهند آورد؛ کاهش TCE به دلیل تغییرات سازه ای- به اندازه ۲۷۷/۵۸ میلیون تن در بازه ی بین سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ بود. پتانسیل اثرات تکنولوژیکی بر روی صنعت فولاد همچنین یک روند منفی را در طی بازه زمانی این مطالعه به ما نشان می دهد. اثرات تکنولوژیکی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰، انتشارات گازهای CO₂ را به صورت تجمعی به مقدار ۱۴۹/۵۲ میلیون تن کاهش داد. در طی سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰، کاهش میزان انتشار

1- Overestimate



شکل ۱۲. مقایسه قراضه فولادی ضروری و منابع قراضه تا سال ۲۰۵۰ میلادی.

یک دوره زمانی خاص افزایش یابد؛ ولی یک روند معمولی از کاهش در تولید فولاد اجتناب‌ناپذیر است. در شکل ۱۲، مقایسه‌ای بین ضرورت قراضه‌های فولادی و منابع قراضه در آینده نشان داده شده است. منابع قراضه برای تأمین ارتقا و ترویج ساختار تولید تحت چهار سناریوی فوق‌الذکر کافی می‌باشد. بد نیست که این نکته نیز اشاره شود که- همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است- طول عمر تنها تأثیر آرام و ملایمی بر روی نسبت قراضه دارد؛ بنابراین هر تغییر و دگرگونی در سیاست ساخت‌وساز، از پیشرفت و تکامل تنظیم ساختاری فولاد جلوگیری نخواهد کرد.

به‌منظور کاهش میزان مصرف انرژی و انتشارات گاز CO₂، بدون شک تولید فولاد به‌عنوان بحرانی‌ترین فاکتور

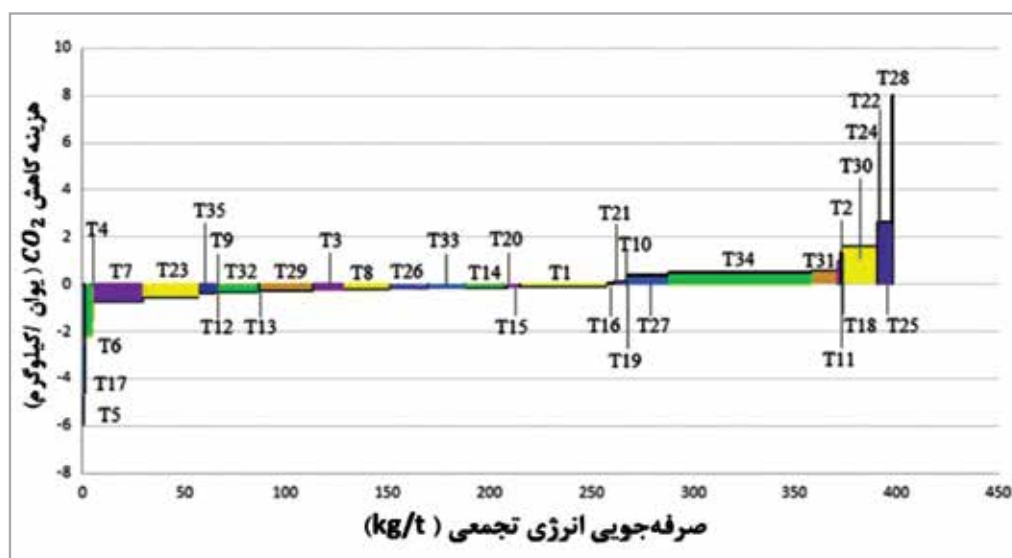
از آن است که تقاضای فولاد، رشد سریع و پایداری را نشان دهد. با این حال مطالعه در زمینه صنعت فولاد چین به این نتیجه رسیده است که تقاضای فولاد به همان اندازه افزایش نخواهد یافت و پیک آن اوایل سال ۲۰۱۳ پدیدار می‌شود. حدس زده می‌شود که دلیل اصلی این موضوع این باشد که رشد اقتصادی سریع قبلی در چین آهسته‌تر شده باشد، که منجر به مصرف کمتر فولاد در جامعه می‌شود. علاوه بر این توسعه اقتصادی بر روی سیاست‌های دولت در خصوص تخریب و بازسازی ساخت‌وساز و یا به‌روز کردن سایر محصولات، تأثیر خواهد گذاشت. رشد GDP کندتر می‌تواند منجر به طولانی شدن و به تعویق افتادن طول عمر محصولات فولادی شود. از سوی دیگر تحت تأثیر سیاست‌ها و بازار فولاد، تولید واقعی ممکن است در



هر تن فولاد تولیدی تا سال ۲۰۳۰، افزایش خواهد داد. پتانسیل القا شده ناشی از ارتقا و ترویج فرآیندهای EST باعث ۵۴/۱۵٪ و ۵۲/۱۰٪ از مجموع پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات گازهای CO₂ در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰ می‌شود و پس از سال ۲۰۳۰ نیز تنظیم ساختار به ترتیب منجر به ۷۹/۸۵٪ و ۸۰/۴۶٪ از مجموع پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات گازهای CO₂ می‌شود. بنابراین تولیدکنندگان فولاد و بخش‌های مرتبط با آن‌ها باید در کوتاه‌مدت توجه بیشتری به فرآیندهای EST داشته باشند. با این حال توسعه فرآیندهای EAF پس از آنکه منابع قراضه به‌تدریج کافی شدند، تمرکز تحقیق و پژوهش خواهد شد.

بد نیست که گفته شود که قبل از سال ۲۰۵۰، بسیاری از تکنولوژی‌ها به بهره‌وری نزدیک به ۱۰۰ درصد خواهند

مدنظر است. تولید بسیار زیاد بدون تقاضای فولاد از ذخیره‌سازی انرژی و حفظ آن و کاهش انتشارات گازهای حاصل جلوگیری خواهد کرد. تحقیقات متعددی، بهره‌وری انرژی را مورد بررسی قرار دادند و فاکتورهایی از جمله EST، ساختار انرژی و سیاست‌ها را ارزیابی کردند [۱۱]، ۲۰، ۴۱]. با این حال از منظر شدت انرژی کمتر، تولید فولاد از طریق فرآیند EAF - که تقریباً یک‌سوم فرآیند BF/BOF است - فرآیندهای فولادسازی کوتاه‌تر به همراه قراضه، پتانسیل بسیار بالایی برای ذخیره انرژی و کاهش انتشارات گازهای حاصل دارد. همان‌طور که شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد، در بازه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰، اثر تنظیم ساختار کمتر از پذیرش و اعمال فرآیندهای EST است. با این حال، در بلندمدت اثر تنظیم ساختار، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازها را به ازای



شکل ۱۳. صرفه‌جویی انرژی تجمعی مربوط به EST موجود در صنعت فولاد چین.

کاهش انتشارات گازهای CO₂ در صنعت فولاد چین تخمین زده شد. همان‌طور که از شکل ۱۳ و ۱۴ مشخص است، هنگامی که نرخ نزولی برابر با ۱۵٪ بود، این ۳۵ فرآیند EST مذکور، توزیع صرفه‌جویی انرژی در حد ۳/۰۱ گیگا ژول به ازای هر تن و توزیع کاهش CO₂ به اندازه ۳۹۸/۲۲ کیلوگرم به ازای هر تن دارند. ۱۹ تکنولوژی مقرون به‌صرفه هستند و صرفه‌جویی تجمعی انرژی آن‌ها ۱/۸۵ گیگا ژول به ازای هر تن است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ نفوذ فرآیندهای EST اثر مهمی بر مزایای انرژی و مقرون به‌صرفه بودن دارند؛ که آن هم تحت تأثیر قیمت انرژی و نرخ نزولی است.

شکل ۱۴ منحنی‌های تأمین حفاظت (CCSC) CO₂ را هنگامی که نرخ نزولی برابر با ۱۵٪ است، نشان می‌دهد. مطابق با تحلیل‌های فوق در سال ۲۰۱۵ شدت TCE در صنعت فولاد چین برابر با ۲۱۲۰/۹۵ کیلوگرم به ازای هر تن است و اگر تمامی ۳۵ EST اعمال شود، به مقدار ۱۱۸۰/۳۳ کیلوگرم به ازای هر تن کاهش خواهد یافت که این مقدار برابر با ۵/۶۵٪ از TCE کنونی است.

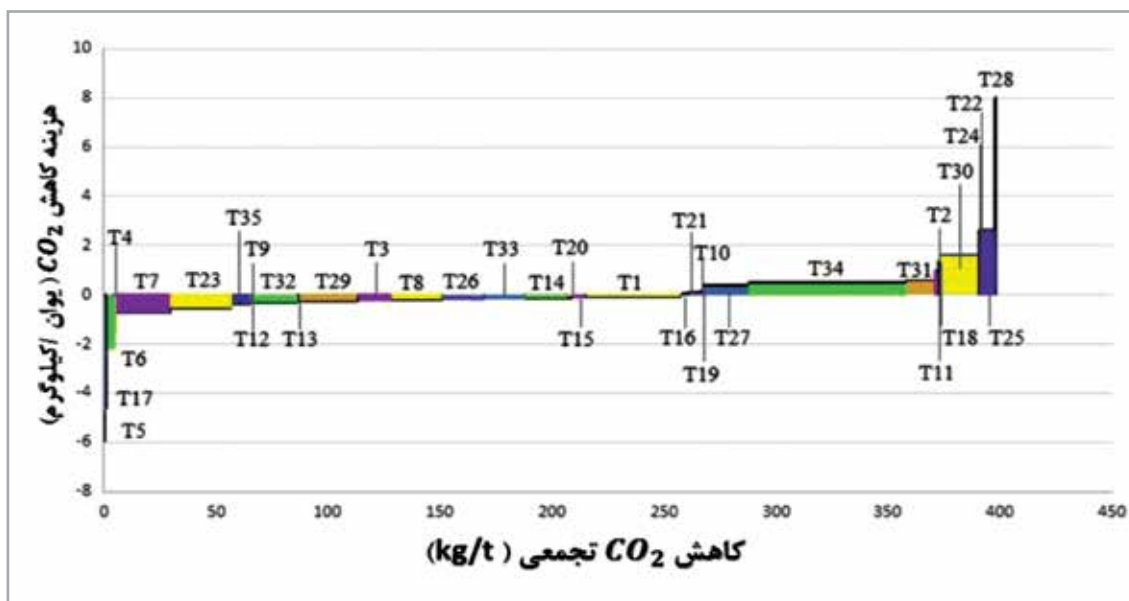
در این مطالعه، به‌منظور تحلیل و بررسی EST با اثربخشی اقتصادی، قیمت CO₂ برابر با ۱۰۰ یوان به ازای هر تن CO₂ در نظر گرفته شد [۱۴]. ۲۲ فرآیند EST مقرون به‌صرفه تشخیص داده شد که کاهش تجمعی CO₂ آن‌ها برابر با ۲۶۱/۰۶ کیلوگرم است که برابر با ۱۲/۳۱٪ از TCE در سال ۲۰۱۵ است. حضور تکنولوژی‌هایی با سود مثبت، باعث می‌شود که هزینه کاهش انتشارات گاز CO₂، نسبتاً پایین‌تر باشد.

در حال حاضر ضروری‌ترین تعهد، به حداکثر رساندن به‌کارگیری فرآیندهای EST با عملکرد ترمودینامیکی و بهره‌وری اقتصادی بالا است؛ که این موارد شامل تزریق

رسید. با افزایش نرخ پذیرش و به‌کارگیری معیارهای بهره‌وری انرژی تحت سناریوهای EEI و STP، پتانسیل ذخیره انرژی و پتانسیل کاهش انتشارات CO₂ کوچک و کوچک‌تر می‌شود. قبل از سال ۲۰۳۰، تحت سناریوهای EEI و STP، پتانسیل فرآیندهای EST، بزرگ است. چون سناریو STP، نرخ پذیرش و اعمال فرآیندهای EST بیشتری دارد، پتانسیل آن با سرعت بیشتری کاهش خواهد یافت. بنابراین در مقایسه با سناریو EEI، اثر EST بر روی مصرف انرژی تحت سناریوی STP، قبل از سال ۲۰۳۰ بزرگ‌تر است؛ اما پس از سال ۲۰۳۰ کوچک‌تر می‌شود.

۵-۲- کارآمدی اقتصادی فرآیندهای EST در صنعت فولاد

اگرچه در آینده تنظیم ساختار، مشارکت بیشتری در صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات گاز CO₂ در صنعت فولاد دارد اما فرآیندهای EST نقش مهم‌تری را قبل از آنکه استفاده از منابع قراضه به سطح بالایی برسند، ایفا می‌کنند. تولیدکنندگان فولاد و بخش‌های دولتی به یک طرح کلی از محبوبیت EST نیاز دارند تا ارجحیت هر فرآیند را در میان فرآیندهای EST تأیید کنند. بنابراین فرآیندهای مقرون به‌صرفه بکار گرفته شده در صنعت فولاد بهترین و سودمندترین مسیر هستند. CSC یک روش تحلیل کمی بسیار مهم - هم از نظر وجه فنی و هم از نظر وجه اقتصادی - برای فرآیندهای EST است؛ این روش به‌طور گسترده به‌منظور ارزیابی پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشارات مواد کربنی در سیستم‌های صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴، ۲۰، ۳۳]. مطابق با اطلاعات جزئی از ۳۵ EST موجود (جدول ۴) و تحلیل و بررسی‌های صورت گرفته [۱۵]، هزینه صرفه‌جویی انرژی و



شکل ۱۴. کاهش CO₂ تجمعی مربوط به EST موجود در صنعت فولاد چین.

زغال سنگ پودر شده^۲، ریخته‌گری پیوسته، تحویل و شارژ داغ^۳ بیلتهای ریخته‌گری شده^۴ می‌باشد که از لحاظ اقتصادی برای شرکت‌های تولیدی قابل اجراست. در طرف مقابل فرآیندهای EST همچون بازیابی حرارت اتلاف شده از آب خنک‌کننده، عملیات سرباره اسفنجی و بازیابی حرارت سرباره که پتانسیل صرفه‌جویی انرژی، کاهش انتشار CO₂، بهره‌وری اقتصادی پایینی دارند؛ از منظر اپراتور شرکت‌ها نباید به دلیل سود کمتر تحت عنوان هدف اولیه سرمایه‌گذاری در نظر و مورد اجرا قرار گیرند. بنابراین توجهات در بلندمدت باید معطوف به گزینه‌های عقلانی از نظر مصرف انرژی و انتشار آلودگی‌ها و در دسترس بودن گزینه‌های تکنولوژیکی بیشتر و گسترده‌تر باشد. بخش تحقیق و توسعه^۱ (R & D) نیاز دارد تا به‌منظور ترویج و ارتقای سطح فنی و کاهش میزان هزینه‌ها، بر روی فرآیندهای EST در حال ظهور و پرهزینه تمرکز نماید.

۳-۵- پیشنهادها و محدودیت‌های پژوهش

صنعت آهن و فولاد یکی از متمرکزترین صنایع تولیدی از نظر کثرت مصرف انرژی و انتشارات آلودگی‌های ناشی از مصرف انرژی^۱ است. به‌منظور ارتقاء مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای CO₂ چندین پیشنهاد ارائه شده است. ابتدا آنکه تولید بیش از اندازه فولاد، دلیل اصلی TEC بالا و انتشار گازهای CO₂ زیاد است. در اقتصاد به بلوغ رسیده یک کاهش بزرگ در تقاضای فولاد برای شرکت‌هایی که رشد سریع اخیر را تجربه می‌کنند بسیار غیرمنطقی است. تولید

فولاد باید مطابق با پیش‌بینی تقاضای آن در آینده باشد. بخش‌های مربوط باید از ورود صنعت به چرخه نامناسب با سود کم و گسترش کورکورانه تولید جلوگیری کنند. در همان زمان بسیار ضروری است که تولیدکنندگان، ظرفیت تولید عقب‌افتاده^۲ را حذف کنند و تولیدات فولادی با ارزش افزوده بالا را توسعه دهند. علاوه بر این باید حتی‌الامکان یک سیستم بازیابی قراضه بهتر به‌زودی زود احداث و راه‌اندازی شود. حتی اگر منابع قراضه از ذخایر موجود همان‌طور که در این تحقیق تخمین زده شده بود به زیادی ۱۵۲ میلیون تن باشد (مطابق شکل ۱۲) که از توانایی بازیابی به‌منظور پردازش و استفاده از تمامی قراضه موجود نیز بسیار فراتر است. منابع قراضه برای توسعه منطقی روش EAF در آینده کافی هستند. نرخ تغذیه آهن اسفنجی در فرآیند EAF که تولید معمولی را تأمین می‌کند باید به تدریج کاهش یابد، زیرا آهن اسفنجی به مقادیر زیادی انرژی نیاز دارد. کیفیت فولاد ثانویه به‌عنوان موضوع دیگری مطرح است که نیاز به تمرکز بیشتری دارد. در حال حاضر تمامی محصولات فولادی از آلیاژهای مختلف ساخته شده‌اند، که این موضوع مشکلات زیادی را برای حفاظت از گریدهای فولاد ثانویه به دلیل آنکه این فولادها محتوی عناصری همچون مس، قلع، نیکل، کروم و روی هستند، به وجود می‌آورند [۴۲]. جهت حذف ناخالصی‌ها، مدیریت ضایعات و تکنولوژی‌های اصلاح پیشرفته، نقش بسیار مهمی را در خصوص جلوگیری از توزیع و پخش آلودگی‌ها در میان انواع مختلف محصولات فولادی دارند. علاوه بر این باید سیاست‌های جدید مالیات



- 1- Research and development
- 2- Backward production capacity
- 3- Converter gas

که با کاهش ظرفیت مواجه شده است، را بازیابی نماید. سوم آنکه، بازسازی صنعت باید با یک برنامه جامع با هم انجام شود. برای مثال تغییرات ساخت و ساز و خودرو بر روی صنایع فلزات غیر آهنی و تولید سیمان نیز اثر گذار خواهد بود؛ همچنین بر صنایع بالادستی همچون معدن زغال سنگ نیز اثر گذار است. تولیدکنندگان و بخش های مرتبط باید در صورت وقوع زیان های بزرگ تر آماده باشند. با این اوصاف، انجام تحقیقاتی همچون تحقیق حاضر، به شدت در سایر صنایع و به خصوص صنعت فولاد ایران پیشنهاد می شود.

تحلیل و بررسی ارائه شده در این تحقیق بر پایه اولویت اشکال و مدل های منطقی بنیان گذاری شده است. اگرچه آن ها همچنین می توانند در سطح کلان ملی در طی چندین دهه آینده فرآیند پیش بینی را انجام دهند، اما محدودیت ها و عدم قطعیت ها غیر قابل اجتناب است که این موضوع نیاز به تحقیق و مطالعه بیشتری دارد. اول آنکه پیش بینی سهم و مصرف فولاد بر پایه شاخص های اقتصادی است؛ موقعیت اقتصادی بهینه شده، تولید فولاد بیشتری را به همراه خواهد داشت. دوم آنکه واردات و صادرات تولید فولاد نیاز به توجه بیشتری دارند. سوم آنکه، مصرف انرژی و انتشار گاز CO₂ از طریق اطلاعات حاصل از شرکت های آهن و فولاد با ابعاد بزرگ یا متوسط اندازه گیری شده است. با این حال اطلاعات شرکت های کوچک و محلی که معمولاً قدیمی^۱ (منسوخ شده) هستند و اطلاعات مناطق متمرکز از نظر انرژی (مناطق با مصرف انرژی بالا) نیز نامعلوم است. این شرکت ها در اسرع وقت نیاز به نظارت دارند. چهارم، اعمال

بر ارزش افزوده و تخفیف مالیاتی توسط دولت ها فرموله شود، تا قیمت بسیار بالای قراضه کنونی را کاهش دهد. در نهایت می توان معضلات و مسائل فنی و کمبود سرمایه را به عنوان موانع اصلی در ارتقاء محبوبیت تکنولوژی های صرفه جویی انرژی و کاهش انتشار گازها برشمرد. در کوتاه مدت، تکنولوژی ها به عنوان نیروی اصلی جهت ارتقاء بهره وری انرژی خواهند بود. بنابراین ضروری ترین وظیفه، به حداکثر رساندن تکنولوژی هایی با بهره وری اقتصادی بالا و نرخ به کارگیری کم همچون تزریق زغال سنگ پودر شده و فرآیند IT برای خالص سازی و بازیابی گازهای مبدل^۲، می باشد. علاوه بر این منطقی است که باید انرژی، استفاده از آن و در دسترس بودن اختیارات تکنولوژیکی با جزئیات بسیار بیشتری مورد مطالعه قرار گیرد.

عناوین و سرفصل های بسیاری در مورد بازسازی ساختار صنعت هستند که ارزش بحث بیشتری دارند. ابتدا آنکه ارتقا و پیشرفت تولید فولاد از طریق فرآیند EAF ضروری است، زیرا منابع قراضه، بیشترشان به هدر می روند و صنعت فولاد موقعیت های پیشروی بسیار زیادی را از دست می دهد. اولویت های هر منطقه در احداث سیستم های بازیابی قراضه باید مورد توجه قرار گیرد. الگوهایی از سیستم بازیابی، با موقعیت مالی بهتر، می توانند در هر یک از نواحی قرار گیرند. دوم آنکه ارتقا و بهبود ابتکار در جاده و کمربندی باعث خواهد شد که صادرات محصولات فولادی به عنوان روشی برد-برد تلقی شود، زیرا این موضوع می تواند هم زمان به ساخت و ساز کشورهای توسعه یافته کمک کند و فشار اقتصادی حاصل از صنعت داخلی فولاد



1- Converter gas
2- Outdated
3- Oxygen-blown blast furnace technology

و به کارگیری تکنولوژی‌های در حال ظهور EST، همچون تکنولوژی کوره انفجاری دمش-اکسیژن^۲، کاهش مصرف انرژی، استخراج و ذخیره‌سازی کربن که در این مقاله در نظر گرفته نشده‌اند، ممکن است بر روی صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشارات گازها اثر حیاتی داشته باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله از مدل‌های MFA دینامیک به‌منظور پیش‌بینی تقاضای فولاد در آینده، مقادیر کافی از منابع قراضه و فاکتورهای مصرف انرژی و انتشارات گاز CO₂ در صنعت فولاد استفاده شد. پیش‌بینی شده است که تقاضای فولاد در جهان به‌طور قابل توجهی در سال ۲۰۱۳ افزایش می‌یابد، اما سپس به تدریج به مقدار در سال‌های بعدی تا سال ۲۰۵۰ میلادی کاهش یابد. ضایعات قدیم، ضایعات خانگی و ضایعات فوری اصلی‌ترین منابع ضایعات و قراضه را تشکیل می‌دهند. برخی کشورها نظیر چین یک افزایش سریع و پایدار در میزان منابع قراضه را در بازه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ تجربه خواهند کرد، که این افزایش، در نتیجه مصرف بالای فولاد در دوره مذکور است. طول عمر به‌طور قابل توجهی بر روی تقاضای فولاد و مقدار قراضه و ضایعات اثرگذار است. با این حال طول عمر، تنها بر روی نسبت قراضه تأثیرگذار است؛ که این فاکتور به‌منظور ارزیابی مقادیر کافی منابع قراضه، معرفی شده است. پس از سال ۲۰۱۵، مصرف کل انرژی داخلی و انتشارات گاز CO₂ به‌طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت و تحت سناریو BAU به ترتیب از مقدار ۱۳۹۳۱/۳۸ پتاژول به ۷۹۹۰/۱۲

پتاژول و از ۱۷۰۴/۸۷ میلیون تن CO₂ به ۹۸۵/۶۳ میلیون تن CO₂ در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید. شدت انرژی و شدت گاز CO₂ نیز به ترتیب از ۱۷/۷۲ GJ/t^۱ و ۱۷/۷۲ kg CO₂/t^۲ در سال ۲۰۱۰ به ۱۵/۷۷ GJ/t^۱ و ۱۹۴۵/۲۳ CO₂/t کاهش خواهد یافت. در مقایسه با سناریو BAU، ۳ سناریوی دیگر از جمله، STA و EEI روند کمتری را نشان می‌دهند. نتایج تجزیه و تحلیل LMDI نشان می‌دهد که تولید فولاد مهم‌ترین نقش را در مصرف انرژی و انتشارات گاز CO₂ دارد. در کوتاه‌مدت آن‌ها وابستگی بیشتری به بهبود تکنولوژی دارند؛ این در حالی است که در بلندمدت علی‌الخصوص پس از سال ۲۰۴۰ پیشرفت ساختار تولید به‌عنوان مهم‌ترین عامل و نیرو در کاهش مصرف انرژی و انتشارات گاز CO₂ مطرح است. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که منابع قراضه و ضایعات برای تأمین پیشرفت ساختار تولید، تحت چهار سناریو کافی باشد. ۳۵ فرایند انتخاب شد تا پتانسیل کاهش مصرف انرژی و انتشارات گاز CO₂ را اندازه‌گیری کند. به‌منظور تخمین مزایای انرژی و بهره‌وری اقتصادی (مقرون به‌صرفه بودن) این تکنولوژی‌ها، CSC تصویب و به کار گرفته شد. تحت شرایط این تحقیق، ۲۲ فرایند EST، مقرون به‌صرفه هستند. فرایندهای EST با عملکرد ترمودینامیکی بالا و بهره‌وری اقتصادی بالا همچون تزریق زغال سنگ پودر شده، ریخته‌گری پیوسته و تحویل و شارژ داغ بیلته‌های ریخته‌گری شده باید در اولویت و ارجحیت توسعه و به کارگیری باشد.

همان‌طور که نتایج پیش‌بینی نشان می‌دهد، تولید فولاد باید مطابق با تقاضای آینده باشد. بخش‌های مربوطه باید از ورود صنعت به چرخه معیوب و نامناسب کم سود و

۱- گیگاژول به ازای هر تن فولاد

۲- کیلوگرم گاز کربن دی اکسید به ازای هر تن فولاد

گسترش کورکورانه تولید جلوگیری به عمل آورند. در همان حین، بسیار ضروری است که تولیدکنندگان ظرفیت تولید عقب‌مانده را حذف نمایند، محصولات فولادی با ارزش افزوده بالا را توسعه دهند و به دنبال صادرات محصولات فولادی باشند. در کشورهایی که منابع قراضه بیشتری دارند و در حین تلف شدن هستند، باید یک سیستم بازیابی قراضه صوتی احداث شود. پیلوت‌های مربوطه می‌توانند در مناطق توسعه یافته مستقر شوند. علاوه بر این بازسازی صنعت نیز باید در میان چندین صنعت مختلف دیگر، با همدیگر و تحت یک برنامه سراسری صورت بگیرد.

مراجع:

- [1] M. Van der Hoeven, D. Houssin, Energy technology perspectives 2015: mobilising innovation to accelerate climate action, International Energy Agency: Paris, France, (2015).
- [2] L. Chen, B. Yang, X. Shen, Z. Xie, F. Sun, Thermodynamic optimization opportunities for the recovery and utilization of residual energy and heat in China's iron and steel industry: A case study, Applied Thermal Engineering, 86 (2015) 151-160.
- [3] B. Yu, X. Li, Y. Qiao, L. Shi, Low-carbon transition of iron and steel industry in China: carbon intensity, economic growth and policy intervention, Journal of Environmental Sciences, 28 (2015) 137-147.
- [4] Y. Xuan, Q. Yue, Forecast of steel demand and the availability of depreciated steel scrap in China, Resources, Conservation and Recycling, 109 (2016) 1-12.
- [5] A. Hasanbeigi, Z. Jiang, L. Price, Retrospective and prospective analysis of the trends of energy use in Chinese iron and steel industry, Journal of cleaner production, 74 (2014) 105-118.
- [6] Y. Liu, M. Duan, Y. Zhao, Decomposition of CO₂ emission influencing factors in China's steel and iron industry based on LMDI method, Safety Environ Eng, 23 (2016) 7-11.
- [7] N. Karali, T. Xu, J. Sathaye, Developing long-term strategies to reduce energy use and CO₂ emissions—analysis of three mitigation scenarios for iron and steel production in China, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 21 (2016) 699-719.
- [8] A. Olsson, Trends and developments in the intensity of steel use: an econometric analysis, in, 2008.
- [9] P. Wang, W. Li, S. Kara, Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in China, Resources, Conservation and Recycling, 117 (2017) 45-57.
- [10] T. Kuramochi, Assessment of midterm CO₂ emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan, Journal of Cleaner Production, 132 (2016) 81-97.
- [11] Z. Wen, F. Meng, M. Chen, Estimates of the potential for energy conservation and CO₂ emissions mitigation based on Asian-Pacific Integrated Model (AIM): the case of the iron and steel industry in China, Journal of cleaner production, 65 (2014) 120-130.
- [12] M. Yellishetty, G.M. Mudd, P.G. Ranjith, A. Tharumarajah, Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects, Environmental science & policy, 14 (2011) 650-663.
- [13] W.R. Morrow III, A. Hasanbeigi, J. Sathaye, T. Xu, Assessment of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries, Journal of Cleaner Production, 65 (2014) 131-141.
- [14] Y. Li, L. Zhu, Cost of energy saving and CO₂ emissions reduction in China's iron and steel sector, Applied Energy, 130 (2014) 603-616.
- [15] Q. Zhang, X. Zhao, H. Lu, T. Ni, Y. Li, Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry, Applied energy, 191 (2017) 502-520.
- [16] J.C. Rojas-Cardenas, A. Hasanbeigi, C. Sheinbaum-Pardo, L. Price, Energy efficiency in the Mexican iron and steel industry from an international perspective, Journal of cleaner production, 158 (2017) 335-348.
- [17] B. Xu, B. Lin, Assessing CO₂ emissions in China's iron and steel industry: A dynamic vector autoregression model, Applied Energy, 161 (2016) 375-386.
- [18] B. Lin, X. Wang, Carbon emissions from energy intensive industry in China: evidence from the iron & steel industry, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47 (2015) 746-754.
- [19] M. Arens, E. Worrell, W. Eichhammer, A. Hasanbeigi, Q. Zhang, Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term—the case of Germany, Journal of Cleaner Production, 163 (2017) 84-98.

- [20] D. Ma, W. Chen, X. Yin, L. Wang, Quantifying the co-benefits of decarbonisation in China's steel sector: an integrated assessment approach, *Applied energy*, 162 (2016) 1225-1237.
- [21] D.B. Müller, Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands, *Ecological Economics*, 59 (2006) 142-156.
- [22] I.E. Agency, I.E. Agency, Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2007.
- [23] K. Tanaka, Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy, *Energy policy*, 36 (2008) 2887-2902.
- [24] B.W. Ang, The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide, *Energy policy*, 33 (2005) 867-871.
- [25] B.W. Ang, A. Mu, P. Zhou, Accounting frameworks for tracking energy efficiency trends, *Energy Economics*, 32 (2010) 1209-1219.
- [26] M. Hu, S. Pauliuk, T. Wang, G. Huppes, E. van der Voet, D.B. Müller, Iron and steel in Chinese residential buildings: A dynamic analysis, *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (2010) 591-600.
- [27] L. Hong, N. Zhou, W. Feng, N. Khanna, D. Fridley, Y. Zhao, K. Sandholt, Building stock dynamics and its impacts on materials and energy demand in China, *Energy Policy*, 94 (2016) 47-55.
- [28] M. Hu, Dynamic material flow analysis to support sustainable built environment development: with case studies on Chinese housing stock dynamics, Department of Industrial Ecology, Institute of Environmental Sciences (CML ...), 2010.
- [29] T. Wu, H. Zhao, X. Ou, Vehicle ownership analysis based on GDP per capita in China: 1963–2050, *Sustainability*, 6 (2014) 4877-4899.
- [30] T. Wu, M. Zhang, X. Ou, Analysis of future vehicle energy demand in China based on a Gompertz function method and computable general equilibrium model, *Energies*, 7 (2014) 7454-7482.
- [31] T.U. CAERC, Sustainable Automotive Energy System in China, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [32] I.P.o.C. Change, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- [33] A. Hasanbeigi, W. Morrow, J. Sathaye, E. Masanet, T. Xu, A bottom-up model to estimate the energy efficiency improvement and CO2 emission reduction potentials in the Chinese iron and steel industry, *Energy*, 50 (2013) 315-325.
- [34] H. Hao, H. Wang, M. Ouyang, F. Cheng, Vehicle survival patterns in China, *Science China Technological Sciences*, 54 (2011) 625-629.
- [35] M. Arens, Technological change and industrial energy efficiency: Exploring the low-carbon transformation of the German iron and steel industry, Utrecht University, 2017.
- [36] Y. Xuan, Q. Yue, Scenario analysis on resource and environmental benefits of imported steel scrap for China's steel industry, *Resources, Conservation and Recycling*, 120 (2017) 186-198.
- [37] W. Chen, X. Yin, D. Ma, A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO2 emissions, *Applied Energy*, 136 (2014) 1174-1183.
- [38] P. Wang, Z. Jiang, X. Geng, S. Hao, X. Zhang, Quantification of Chinese steel cycle flow: Historical status and future options, *Resources, Conservation and Recycling*, 87 (2014) 191-199.
- [39] X. Yin, W. Chen, Trends and development of steel demand in China: A bottom-up analysis, *Resources Policy*, 38 (2013) 407-415.
- [40] S. Pauliuk, T. Wang, D.B. Müller, Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle, *Environmental science & technology*, 46 (2011) 148-154.
- [41] K. Wang, C. Wang, X. Lu, J. Chen, Scenario analysis on CO2 emissions reduction potential in China's iron and steel industry, *Energy Policy*, 35 (2007) 2320-2335.
- [42] J. Oda, K. Akimoto, T. Tomoda, Long-term global availability of steel scrap, *Resources, Conservation and Recycling*, 81 (2013) 81-91.

راهنمای تهیه و تدوین مقالات دو ماهنامه‌ی آهن و فولاد

اهداف فصلنامه:

- ✓ انتقال تجارب علمی و کمک به نشر دانش
- ✓ فراهم کردن زمینه‌های ارتباط علمی بین صنایع و دانشگاهها
- ✓ انتشارات مفاهیم تجربه شده در میدان عمل
- ✓ معرفی فعالیت‌های 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 جنبه‌های علمی و پژوهشی قوی باشد.
- حاوی ایده‌های 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 پا بین ۳ سانتیمتر و چپ و راست ۲.۵ سانتیمتر و فاصله خطوط ۰.۸ سانتیمتر به زبان فارسی تایپ و از طریق سامانه <http://ironandsteel.msc.ir> بارگذاری گردد.
- مقاله دارای چکیده حداکثر ۱۵۰ کلمه و حجم مقاله حداکثر ۱۵ صفحه باشد و واژگان کلیدی حداقل ۴ و حداکثر ۸ کلمه.
- مقاله‌های ارسالی باید دارای بخش‌های زیر باشد:
- 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)...
- 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)
- برای مقاله‌های مروری چکیده، مقدمه، متن مقاله، ارائه چارچوب ادراکی، جمع بندی و ذکر منابع لازم است.
- ارجاعات در متن و پایان مقاله به روش‌های 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 نمونه‌های زیر به ترتیب الفبایی نام خانوادگی نویسنده 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 مقاله‌ها، بدون تغییر در اصل و محتوا آزاد است.
- مقاله‌های رسیده برگشت داده نمی شود.
- به پیوست یک قطعه عکس با dpi ۳۰۰ از نویسنده یا نویسندگان به همراه ایمیل و شماره تلفن همراه دریافت می شود.

دستورالعمل دآوری مقالات مجله آهن و فولاد

اهداف:

- دآوری 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 دآوری ارسال می گردد.
- حداکثر دو هفته به داوران فرصت داده می شود که نظرات و نتیجه دآوری 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 دآوری بین ۳۹ - ۵۰ باشد به صورت چاپ برای فصلنامه انتخاب می گردند (در صورت زیاد بودن مقالات، مقالات دارای رتبه بالاتر در 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