

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

منصور طورانی^۱، پژوهشکده فولاد، دانشگاه صنعتی اصفهان

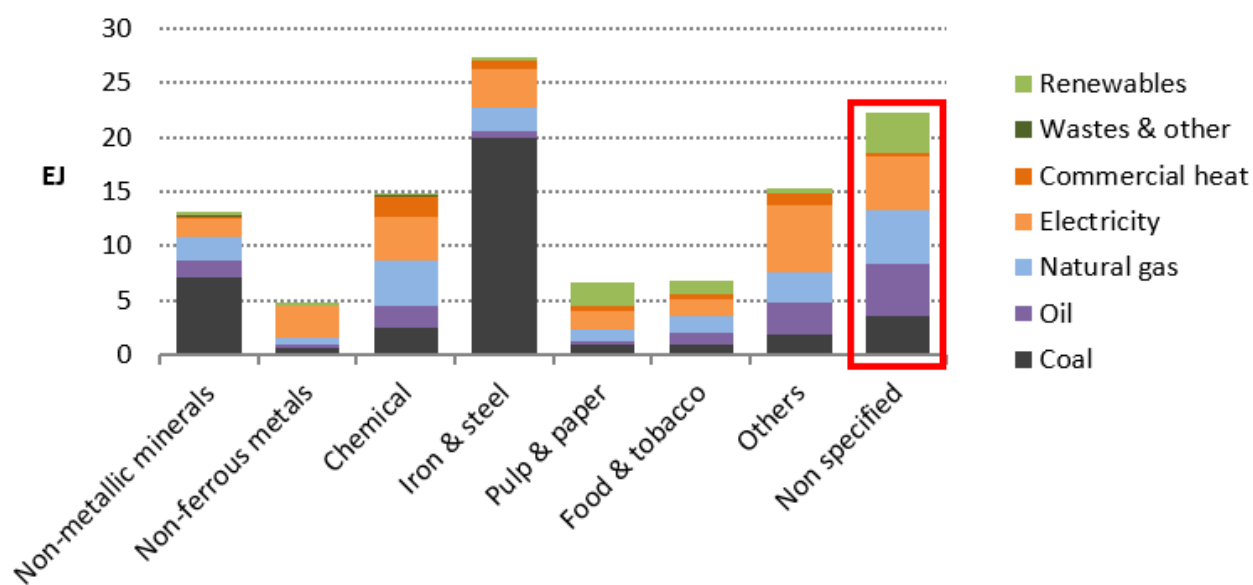
چکیده:

از آنجایی که شاخص مصرف انرژی در صنعت فولاد ایران نسبت به شاخص کارخانجات پیشرفته و مدرن دنیا فاصله زیادی دارد، لذا برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های مناسب جهت کاهش مصرف انرژی در صنایع تولید فولاد و در نتیجه افزایش نرخ تولید و کاهش قیمت تمام شده فولاد، امری ضروری می‌باشد. خوشبختانه با توجه به تجربیات و مطالعات صورت گرفته در دنیا، جهت کاهش مصرف انرژی در صنعت فولاد ایران نیازی به ابداع روش‌های جدید نبوده و راهکارهای موفقیت‌آمیز مورد استفاده در کارخانجات دیگر می‌تواند راهگشا باشد. به همین دلیل در این تحقیق به بررسی انواع روش‌های مؤثر جهت کاهش مصرف انرژی در کوره احیا مستقیم میدرکس و کوره قوس الکتریکی پرداخته شده است. به کارگیری روش‌های ذکر شده در هر قسمت می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی، افزایش سرعت تولید، بهبود کیفیت فولاد و کاهش قیمت تمام شده آن شود. امید است به‌زودی شاهد توجه بیشتر در زمینه به کارگیری روش‌های ذکر شده در صنعت فولاد کشور باشیم.

¹ faranimt@gmail.com

۱- مقدمه:

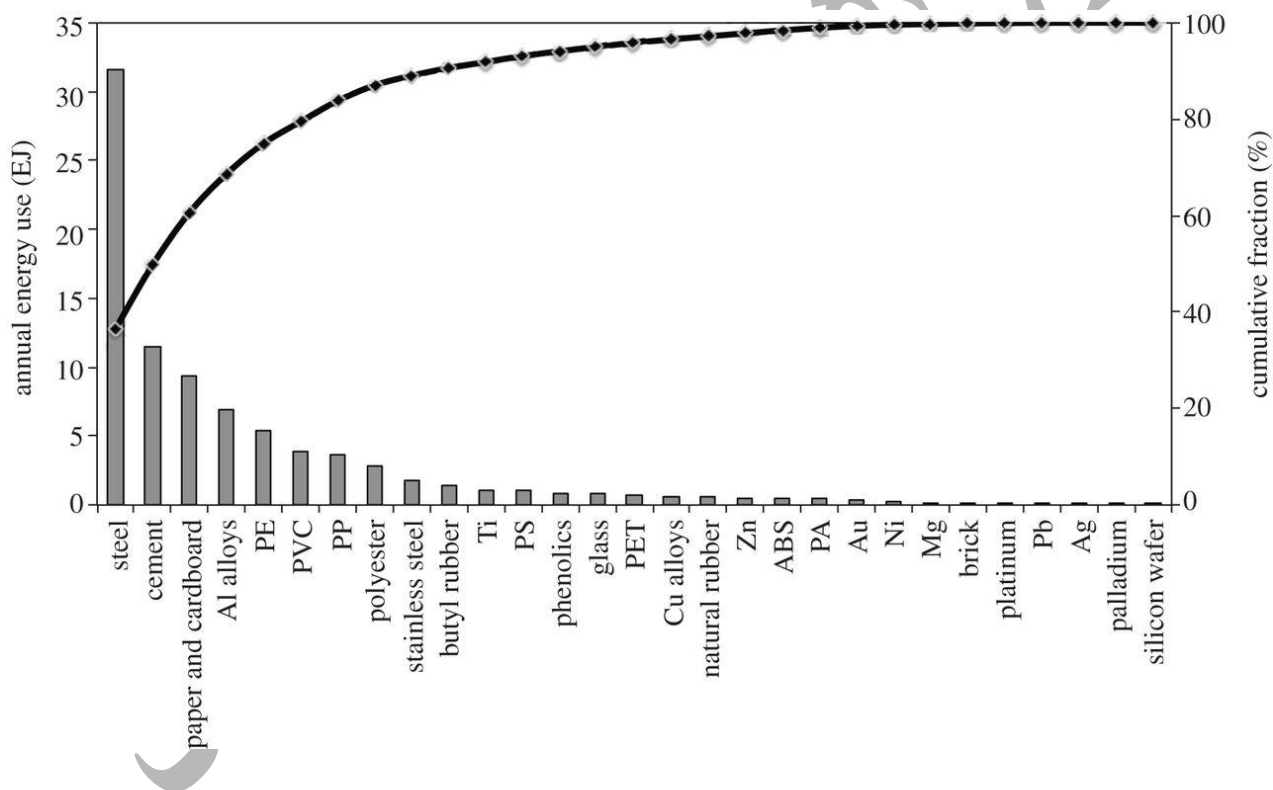
با توجه به روند روز افزون تولید فولاد در جهان و برنامه‌های توسعه تولید فولاد در کشور ایران (افق ۱۴۰۴)، مصرف انرژی در این صنعت روزبه‌روز افزایش می‌یابد. بر اساس برخی از تحقیقات صورت گرفته، حدود ۸-۱۲٪ انرژی تولید شده در جهان در بخش آهن و فولاد مصرف می‌شود. پیش‌بینی می‌شود مصرف انرژی در صنایع آهن و فولاد تا سال ۲۰۲۰ به حدود ۱۳۵ اگرا ژول برسد. 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].



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

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 مصرف انرژی در جهان بوده است. تاکنون در کشور ما به علت نرخ پایین انرژی انگیزه کافی برای صرفه‌جویی در

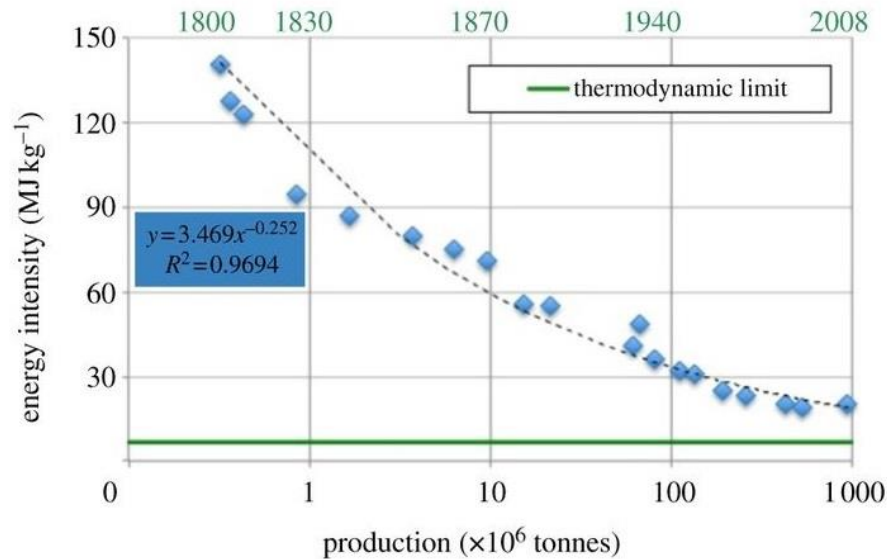
مصرف انرژی مخصوصاً در صنایع فولاد وجود نداشته است؛ ولی هم‌اکنون عدم توجه به این امر و افزایش قیمت تمام شده مشکلات زیادی را در راه تولید فولاد کشور ایجاد خواهد کرد. به علاوه اینکه کاهش قیمت تمام شده جهت حضور در بازارهای رقابتی جهانی، امری ضروری می‌باشد. جهت اذعان به اهمیت نقش انرژی در کاهش قیمت فولاد 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.



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

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.



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

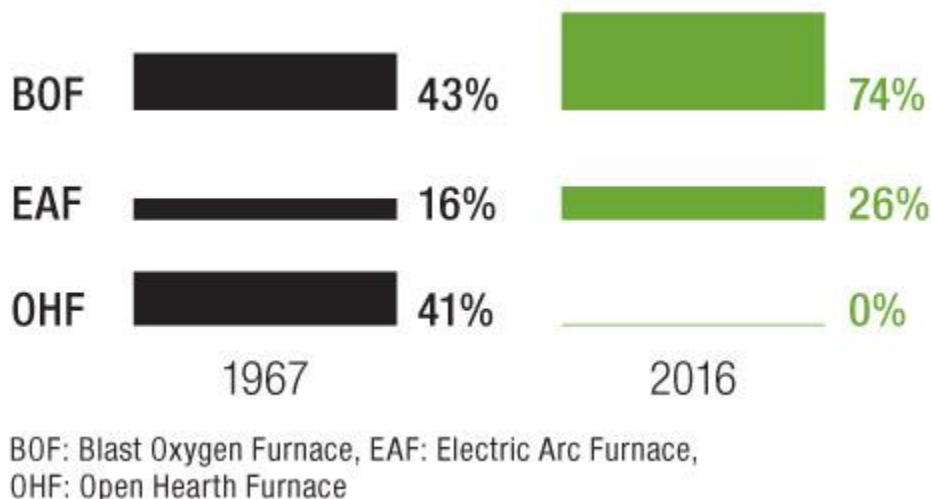
با شناخت و به کارگیری راه‌حل‌های منطقی مورد استفاده در صنایع بزرگ فولادسازی جهان جهت کاهش مصرف انرژی و استفاده از تجربیات آن‌ها و بدون نیاز به ابداع روش‌های جدید می‌توان راهکارهای مطلوب را جهت اعمال در صنعت فولادسازی ایران به کار برد. با وجود مشکلات ساختاری زیاد در صنایع ایران، جهت حضور قدرتمندانه در 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 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 محیط‌زیست 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 آلاینده‌گی‌ها 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٪ کاهش داد [۴].

سهم 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 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

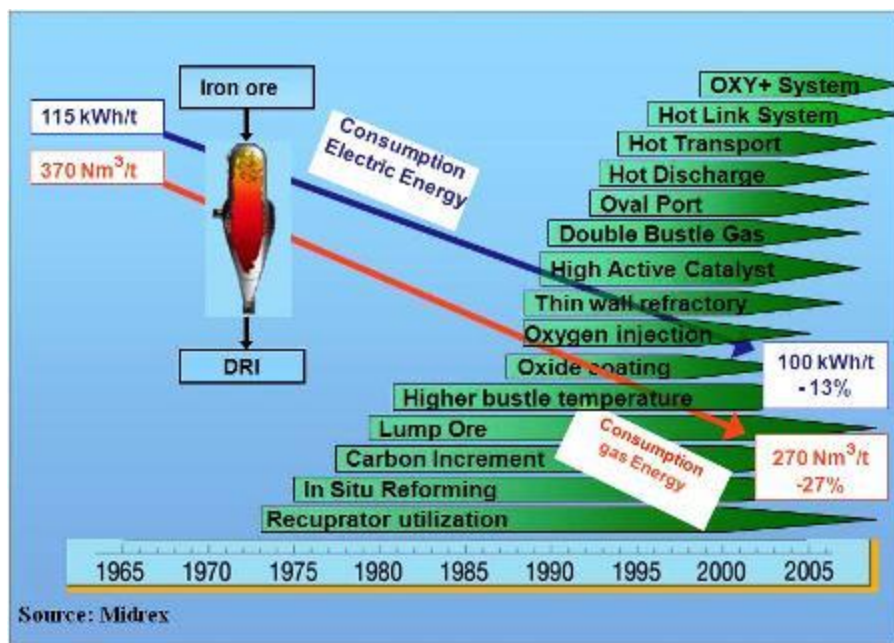
تولید فولاد به روش کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد. چون بالاترین میزان مصرف گاز در فرایند احیاء مستقیم (DRI) و بالاترین میزان مصرف برق در کوره قوس الکتریکی (EAF) می‌باشد، دو سرفصل اصلی این مقاله در زمینه کاهش مصرف گاز طبیعی در فرایند احیا مستقیم میدرکس و کاهش مصرف برق در کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد. روش‌های کاهش مصرف گاز طبیعی در فرآیند احیاء مستقیم و نیز انرژی الکتریکی در بخش کوره‌های قوس الکتریکی نیازمند مطالعه و برنامه‌ریزی دقیق می‌باشد. یک راه‌حل منطقی و نسبتاً آسان توجه به بازیافت 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.



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

۲- روش های بهینه سازی مصرف انرژی در واحد احیا مستقیم میدرکس

بهبودهای گوناگونی بر روی فرآیند میدرکس انجام شده اند، 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 CO₂ 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 خروجی کوره میدرکس به صورت کاملاً داغ و با درجه حرارت بالا مستقیماً به مخزن ذخیره آهن اسفنجی در بالای کوره EAF منتقل شده و می‌توان از این طریق صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی الکتریکی کوره قوس به عمل آورد. این مورد به طور مفصل در قسمت مربوط به بهینه‌سازی انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی شرح داده می‌شود.



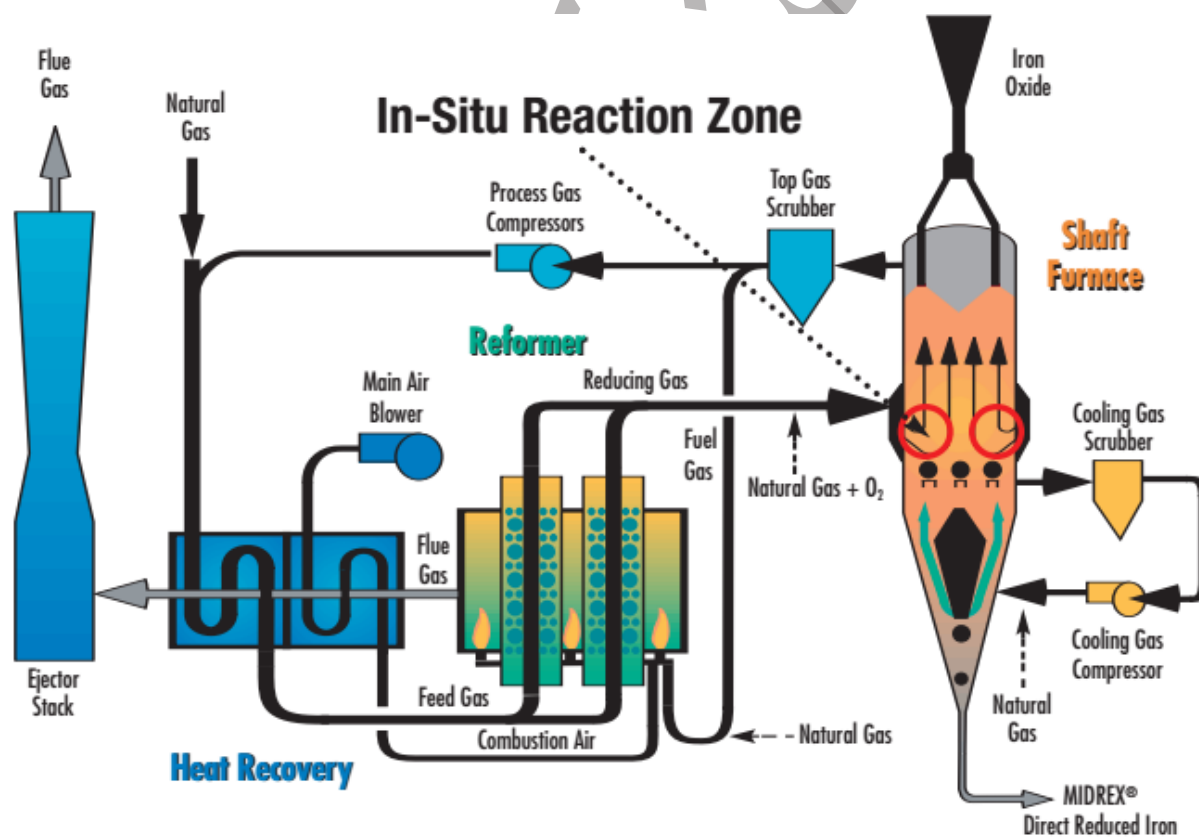
شکل ۵: نوآوری و تکنیک‌های جدید و پیشنهادی جهت کاهش مصرف انرژی (گاز طبیعی) در احیا مستقیم میدرکس.

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 ریفورمر 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].



شکل ۶: شماتیک فرایند استاندارد میدرکس برای تولید بریکت داغ [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 سنگ آهن کلوخه هماتیته در بار کوره میدرکس

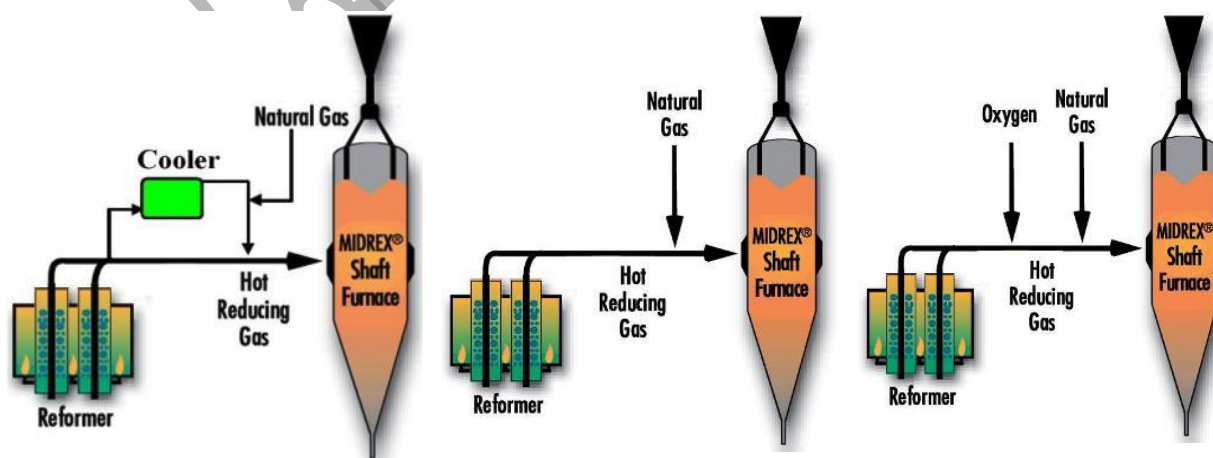
استفاده از سنگ آهن کلوخه هماتیته باعث کاهش چسبندگی گندله‌ها به یکدیگر شده و در نتیجه می‌توان درجه حرارت گاز احیایی به کوره میدرکس را تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داد که خود باعث بهبود بهره‌وری کوره احیا به میزان حدود ۱۳٪ می‌شود. قیمت سنگ آهن کلوخه‌ای از گندله ارزان‌تر می‌باشد. نکته مهم در اینجا این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

۲-۶ تجهیزات پوشش دهی گندله و تزریق اکسیژن

اگرچه افزایش درجه حرارت گاز ورودی به کوره احیا مستقیم منجر به افزایش بهره‌وری می‌شود، ولیکن افزایش درجه حرارت باعث چسبندگی گندله‌ها به یکدیگر و بروز مشکلات عملیاتی می‌گردد. با توجه به ضروریات حیاتی افزایش درجه حرارت گاز ورودی، می‌بایست راه‌حلی برای جلوگیری از چسبندگی گندله‌ها پیدا می‌شد. پس از مطالعات بسیار سرانجام مشخص شد که استفاده از سنگ آهن کلوخه و نیز پوشش دادن گندله‌ها با موادی نظیر آهک، سیمان و دلومیت می‌تواند از چسبندگی گندله‌ها 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 می‌تواند بدون بروز هیچ مشکلی تا ۹۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. برای افزایش حرارت تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد در مرحله اول، فقط کافی است که خنک‌کننده گاز احیایی از مدار خارج گردد، ولی برای تأمین درجه حرارت بالاتر تا ۹۲۰ درجه سانتی‌گراد، 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 می‌شوند [۵]. موارد بیان شده در شکل ۷ به خوبی نشان داده شده است.



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

۲-۷ 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].

۲-۸ استفاده از کاتالیزورهای بسیار فعال

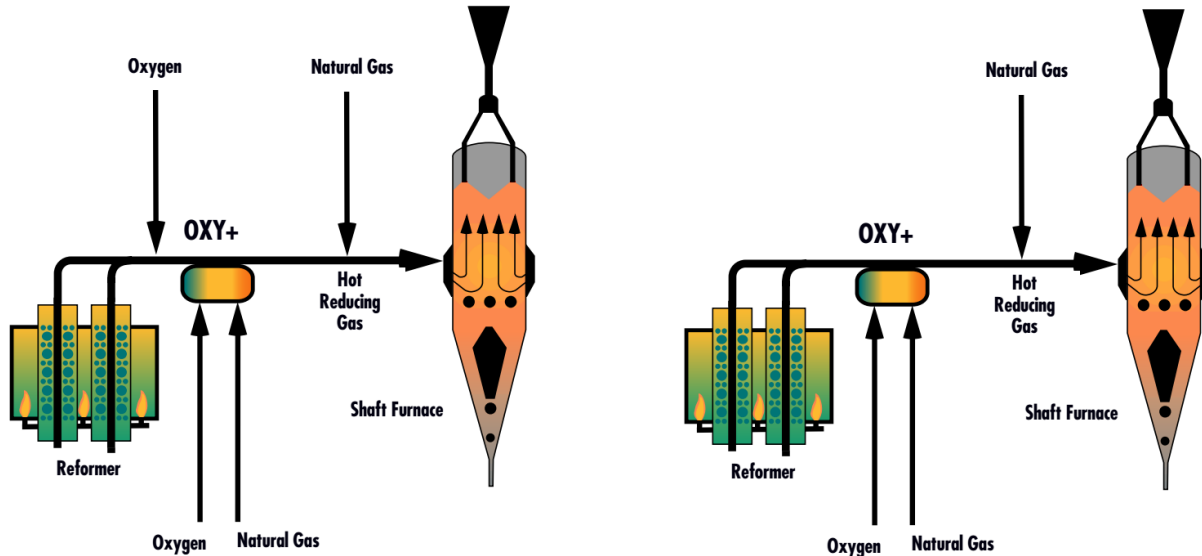
از آنجایی که واکنش ریفورمینگ ترکیبات هیدروکربنی با اکسندهایی مثل H_2O و CO_2 فرایند گرماگیر می باشد لذا رخدادهای آن نیازمند کاتالیست برای تسریع واکنش و انجام میزان درصد تبدیل مطلوب می باشد. امروزه تحقیقات زیادی جهت معرفی کاتالیست های بسیار فعال به عنوان قلب تپنده واحدهای احیا صورت می گیرد. چند مثال از 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+

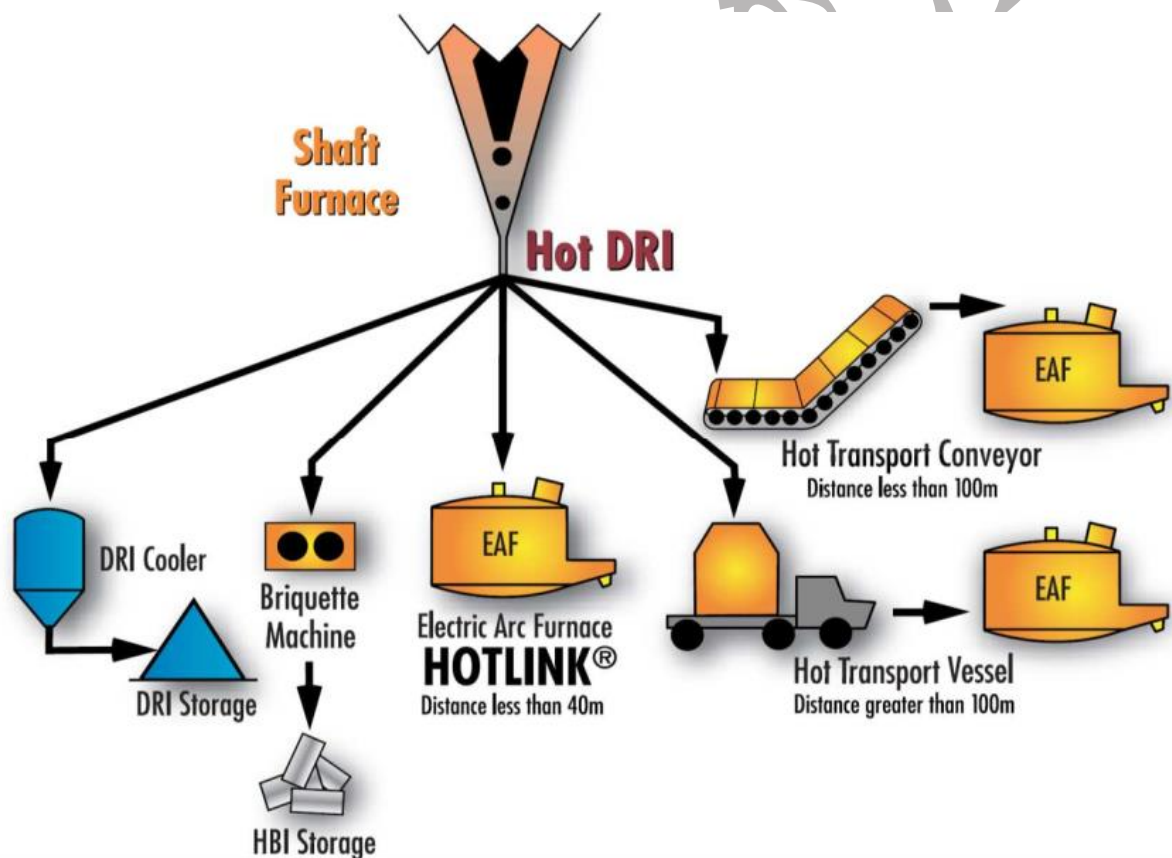
سیستم $OXY+$ به منظور شکست جزئی گاز طبیعی با اکسیژن و تولید گازهای CO و H_2 ابداع شده است. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، $OXY+$ علاوه بر ریفرمر از یک محفظه احتراق نیز استفاده می‌کند. این محفظه احتراق، گاز طبیعی و اکسیژن را به صورت ناقص می‌سوزاند تا هیدروژن و مونوکسید کربن تولید کند، که به گاز کاهنده (احیا کننده) که توسط ریفرمر تولید شده است اضافه گردیده و به بهره‌وری کوره می‌افزایند. قلب این سیستم، راکتور $OXY+$ می‌باشد که در آن گاز طبیعی و اکسیژن مخلوط شده و در دو مرحله می‌سوزند. با عملکرد صحیح سیستم، تولید دوده حذف شده و گاز طبیعی به گازهای CO و H_2 تبدیل می‌گردد. مهم‌ترین موضوع برای عملکرد موفق این سیستم، دقت کافی سیستم کنترل آن می‌باشد. سیستم کنترل می‌باید میزان هر 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٪- CO و H_2 خواهیم داشت. این سیستم می‌تواند تا حدود ۴٪ به تولید کوره بی‌افزاید.



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

۲-۱۱ سیستم شارژ داغ آهن اسفنجی

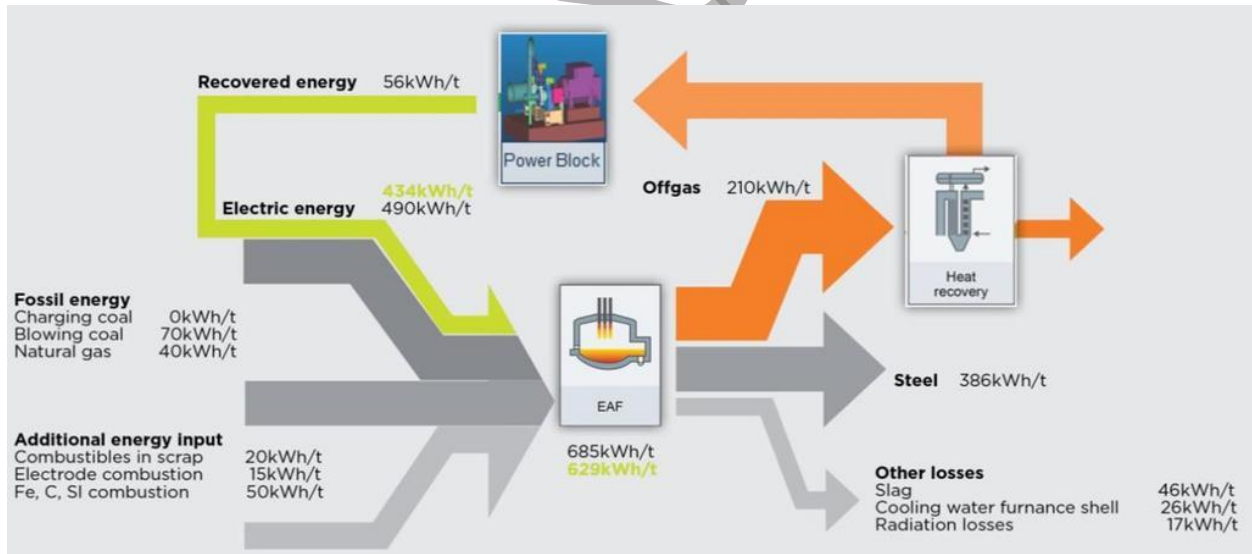
از آنجایی که محصولات تولیدی از فرایند DRI دارای بازده انرژی بسیاری زیادی هستند، استفاده از این انرژی حرارتی فوق‌العاده قبل از آزاد شدن آن می‌تواند کمک شایانی به کاهش مصرف انرژی در فرایند فولادسازی نماید [۵]. در مورد فرایند شارژ داغ آهن اسفنجی در بخش ۳ به طور کامل توضیح داده می‌شود. انواع ممکن برای شارژ 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.



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

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 [۷].

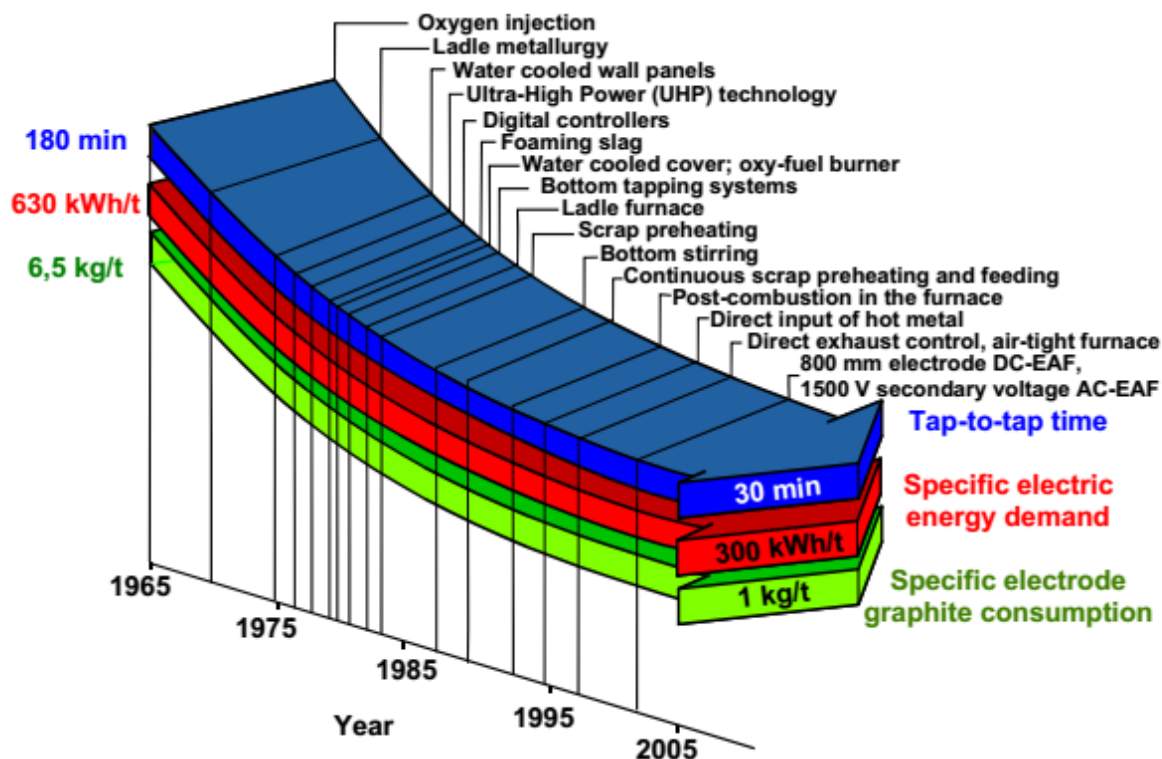


شکل ۱۰: انرژی‌های ورودی و خروجی در سیستم فولادسازی به روش کوره قوس الکتریکی

یکی از مهم‌ترین راهکارها جهت کاهش هزینه تولید و مهم‌ترین جنبه پیشرفت در کوره‌های قوس الکتریکی، کاهش مصرف انرژی الکتریکی می‌باشد. گزارش شده است 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 سرباره زه، مصرف سوخت‌های کمکی، اکسیژن، درجه حرارت تخلیه و مدت زمان عبور و قطع برق از جمله عوامل مؤثر هستند [۸].

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.



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

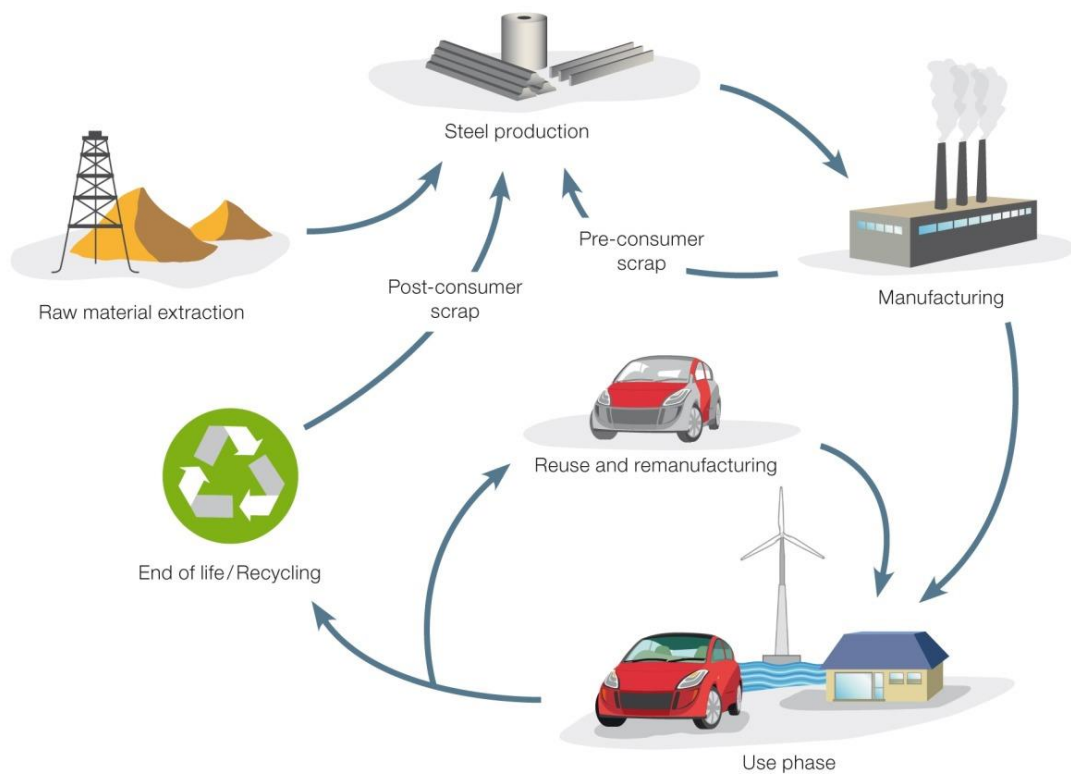
در ادامه برخی از موارد کاربردی موفق جهت کاهش مصرف انرژی در کوره‌های EAF مورد بحث قرار می‌گیرد.

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 بازیافت 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، 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 CO₂ 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].

THE LIFE CYCLE OF STEEL



Source: worldsteel

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

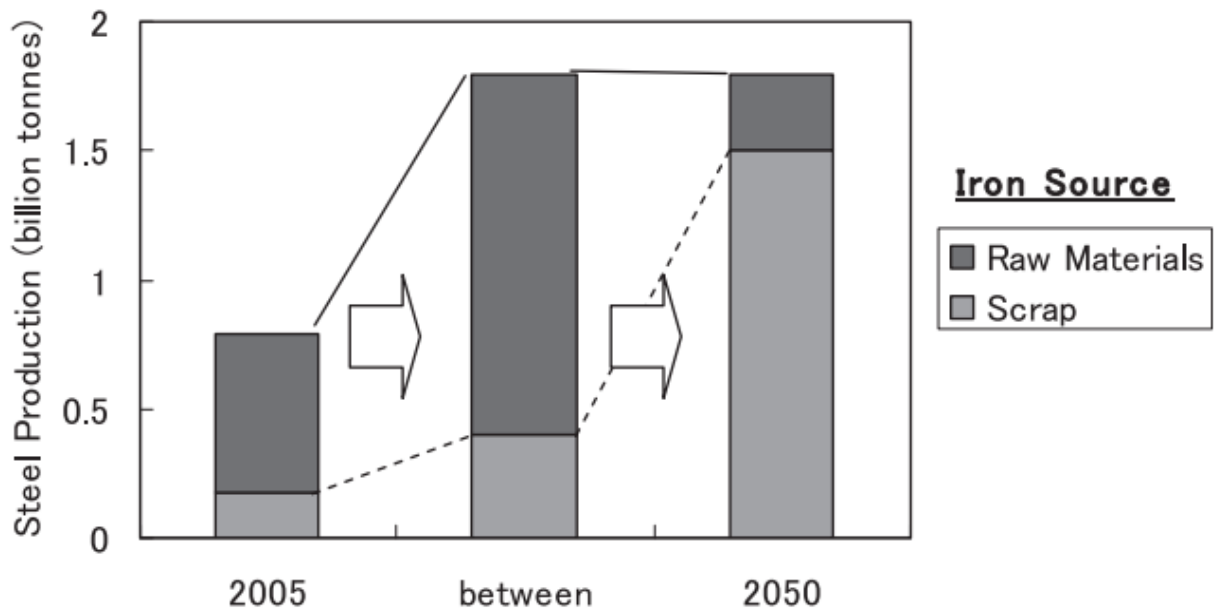
به منظور بررسی تأثیر درصد استفاده از قراضه به عنوان ماده اولیه در کاهش مصرف انرژی، اطلاعات مربوط به تولیدات، مواد اولیه و مصرف انرژی در ۵ واحد بزرگ تولید کننده فولاد (با تکنولوژی‌های مختلف تولید) در جدول

۱ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که افزایش درصد آهن 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 صرفه‌جویی سالانه مصرف انرژی رخ می‌دهد.

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	۱۸.۲۸
۳	احیای مستقیم با کوره- های قوس الکتریکی	۳	۰.۱۴۳	۰.۰۴۷	۲۵.۴۶
۴	ذوب قراضه در کوره‌های 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

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].



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

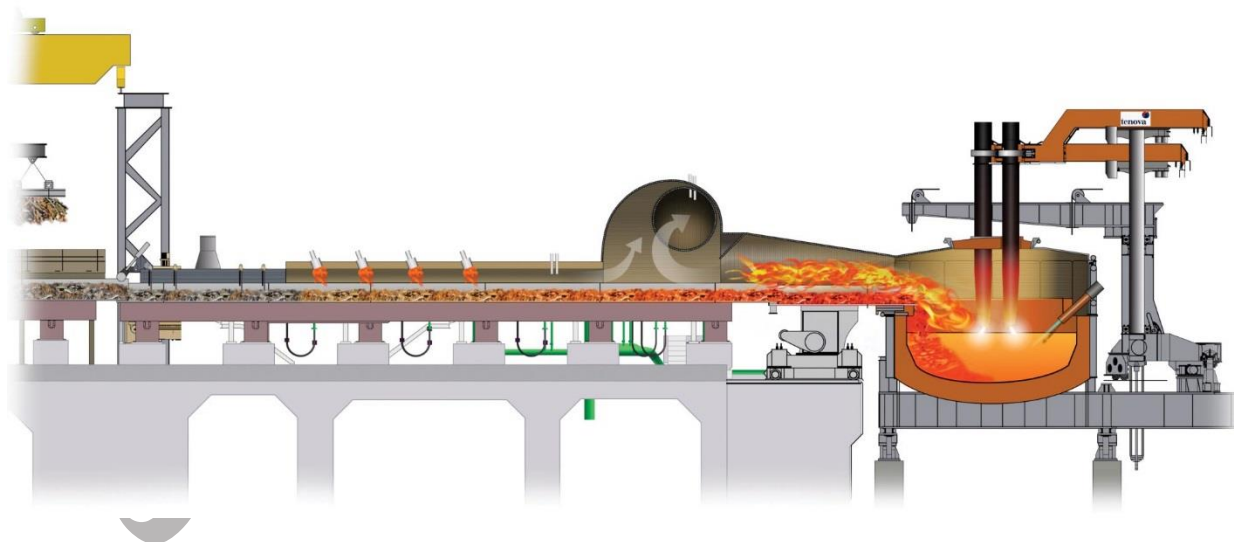
۳-۱-۱ اصلاح بارگیری قراضه

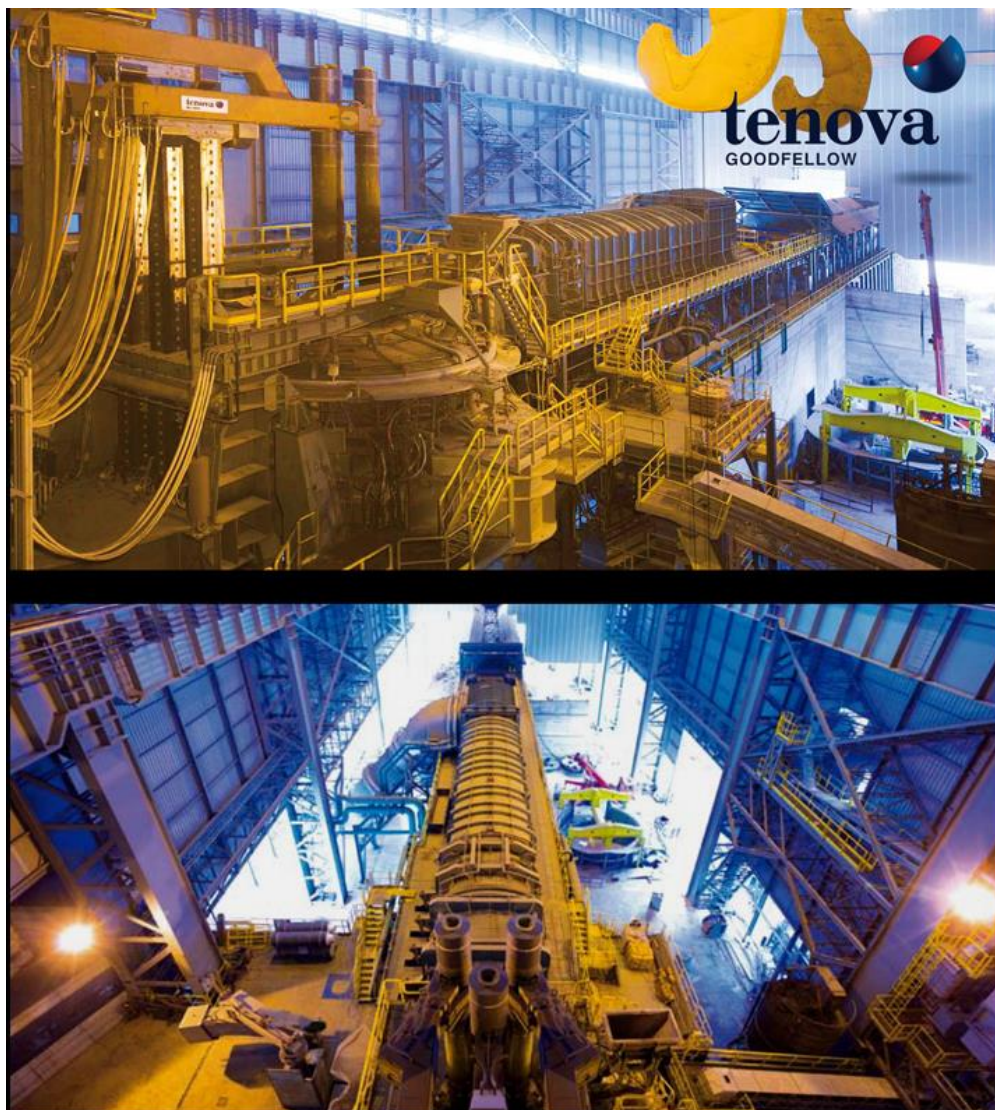
ابعاد قراضه‌های مصرفی در کوره‌های قوس الکتریکی تأثیر بسزایی در مصرف انرژی دارد. مشخص است که کاهش ابعاد قراضه منجر به کاهش مصرف انرژی لازم برای ذوب می‌شود. همچنین افزایش ظرفیت سبدهای تغذیه قراضه به کوره‌های قوس الکتریکی منجر به کاهش تعداد دفعات باز شدن درب کوره و در نتیجه افزایش راندمان فرایند می‌شود. به همین دلیل سایز 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 سبد 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 سبد توصیه نشده است. جهت کاهش سائز قراضه‌ها و افزایش دانسیته سبدهای شارژ قراضه می‌توان طراحی‌های خاصی در زمینه استفاده از دستگاه‌های برش و پرس مکانیزه انجام داد.

۳-۲- پیش‌گرمایش مواد ورودی به کوره EAF

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، میزان انرژی مربوط به گازهای خروجی از کوره قوس الکتریکی حدود ۳۰٪ می‌باشد بنابراین استفاده از انرژی حرارتی گاز خروجی از کوره به عنوان منبع عظیم انرژی برای پیش‌گرمایش آهن می‌تواند به صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی در کوره‌های EAF کمک نماید. با توجه به اینکه مواد مصرفی در کوره EAF شامل آهن قراضه و آهن اسفنجی می‌باشد؛ لذا پیش‌گرمایش هر دو این مواد می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد.



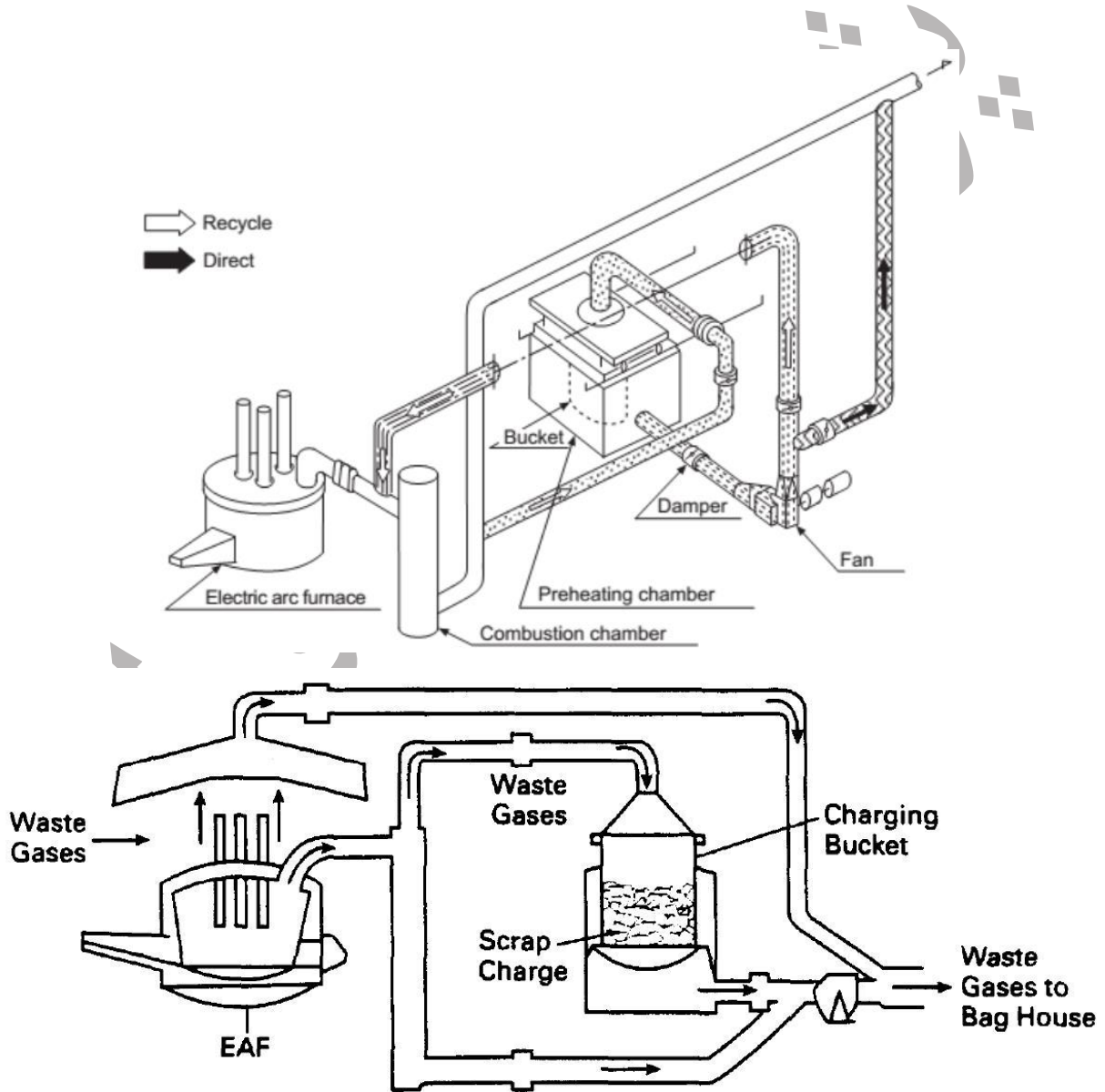


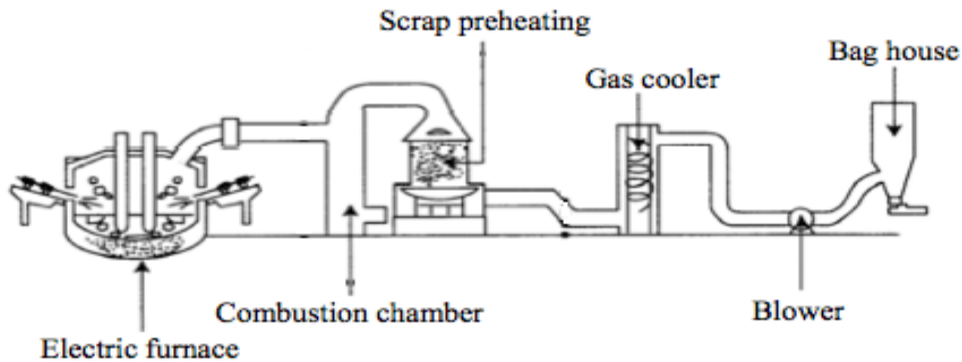
شکل ۱۴: سیستم پیش گرمایش مواد ورودی به کوره قوس الکتریکی، پیشنهاد شده توسط شرکت Tenova.

پیش گرمایش 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، پیش گرمایش 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

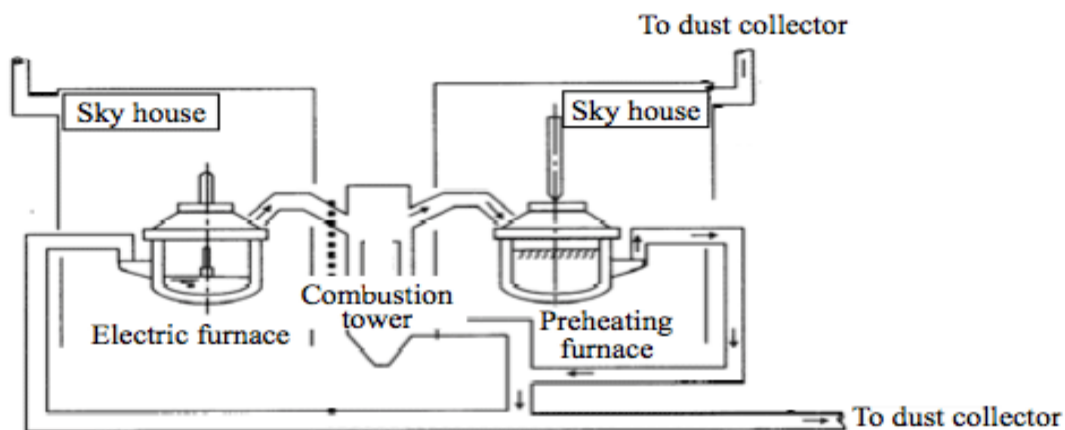
دلیل شرایط زنبیل‌های تغذیه قراضه آهن، معمولاً پیش گرم بیشتر از ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد توصیه نمی‌شود. فرایندهای پیش گرم قراضه عبارت‌اند از:

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



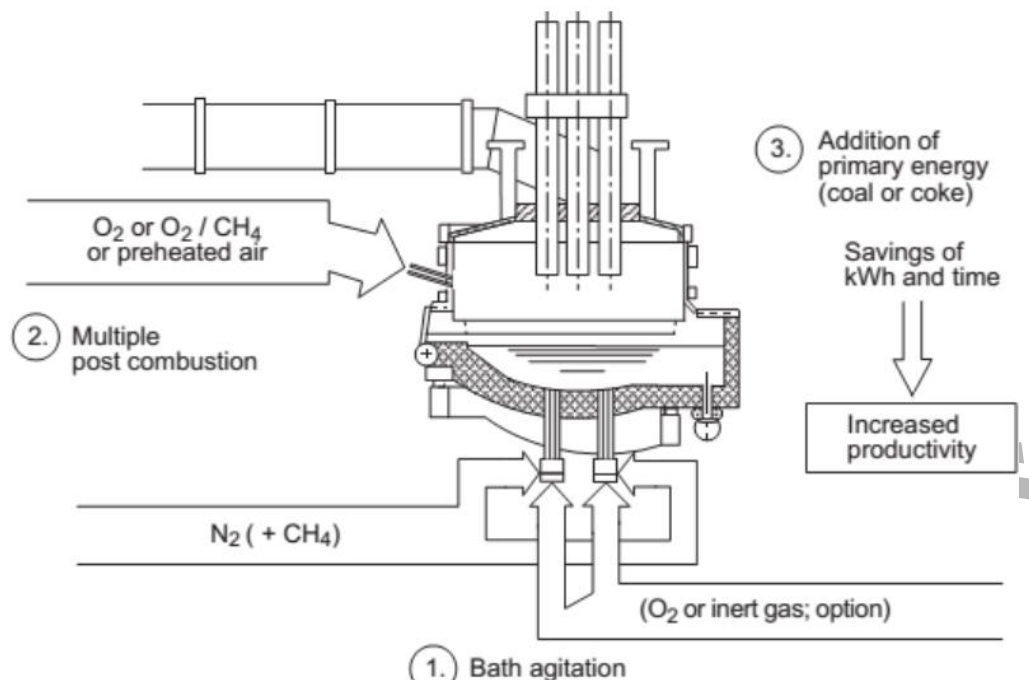


Bucket-type scrap preheating system



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

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 CO_2 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 چند مرحله‌ای گاز خروجی و افزایش سرعت ذوب، از مزایای این فرایند می‌باشد [۱۱]. شماتیکی از فرایند KE-S در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶: شماتیک فرایند KE-S [۱۱].

ج) شافت پیش گرم: این شافت در کنار کوره قوس ساخته می شود و با گازهای خروجی و مبدل های حرارتی عمل می کند. قراضه درون شافت، توسط گازهای داغ خروجی پیش گرم می شود. گاز خروجی از شافت از محفظه سوخت عبور کرده تا هیدروکربن هایی که از قراضه وارد آن شده است، بسوزد [۱۱].

پیش گرمایش آهن اسفنجی نسبت به آهن قراضه از مشکلات و پیچیدگی های بیشتری برخوردار می باشد. همان طور که مشخص است، افزایش دما منجر به افزایش تمایل آهن اسفنجی جهت واکنش با اکسیژن می شود. به همین دلیل استفاده از گازهای خنثی و ارزان قیمت نظیر نیتروژن جهت محافظت آهن اسفنجی در برابر تماس با هوا توصیه می شود. از آنجایی که در صنعت فولاد ایران، میزان سهم آهن اسفنجی بیشتر از سهم قراضه آهن می باشد؛ لذا تحقیق در زمینه پیش گرمایش آهن اسفنجی می تواند منجر به صرفه جویی قابل ملاحظه انرژی الکتریکی شود. می توان از طرح های پیشنهادی در این زمینه استفاده کرد. می توان نیتروژن را توسط فن به درون لوله های فولادی و از آنجا به درون سیلوهای

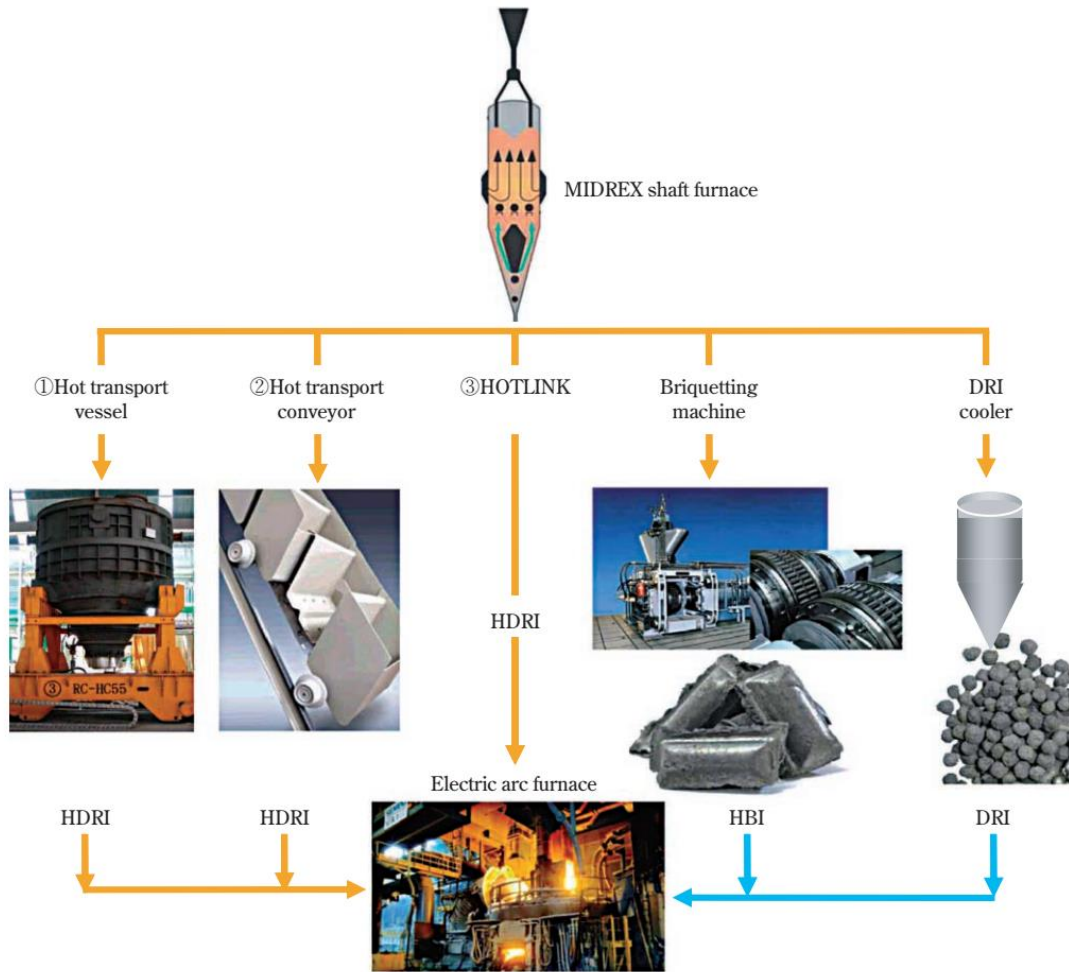
نگهداری آهن اسفنجی وارد نمود. لوله‌های فولادی بایستی از مسیر عبور گازهای داغ خروجی از کوره عبور کنند. در نتیجه با عبور نیتروژن از درون این لوله‌های فولادی، می‌توان گرمای زیادی را به سیلوهای نگهداری آهن اسفنجی منتقل نمود. میزان مصرف نیتروژن در این حالت زیاد بوده و می‌توان در طرح‌های پیشرفته‌تر نیتروژن خروجی از سیلو را دوباره جمع‌آوری و پس از فیلتر کردن، استفاده نمود.

تأثیر پیش‌گرمایش آهن بر کارایی کوره قوس الکتریکی با استفاده از 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 پیش‌گرم آهن اسفنجی و قراضه پیش‌گرم 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 ۷۰۰-۶۵۰ 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].

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 به‌صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است.

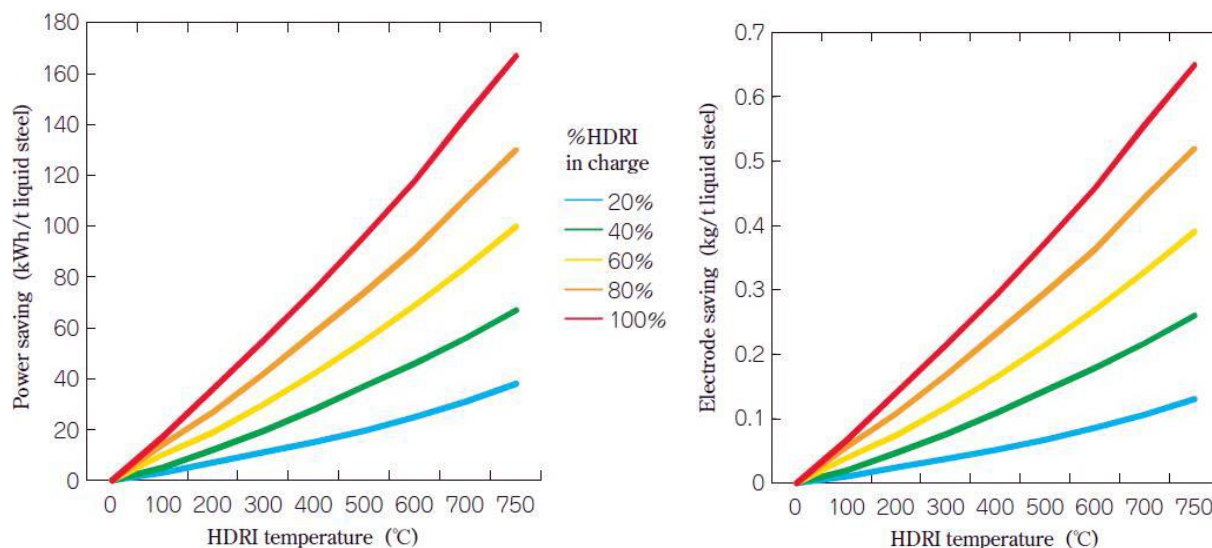


شکل ۱۷: روش های انتقال از کوره میدرکس به کوره قوس الکتریکی [۵].

جدول ۲: روش های 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

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 الکتروود 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.



شکل ۱۸: صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی و مصرف الکتروود در کوره‌های قوس الکتریکی با استفاده از شارژ HDRI [۵].

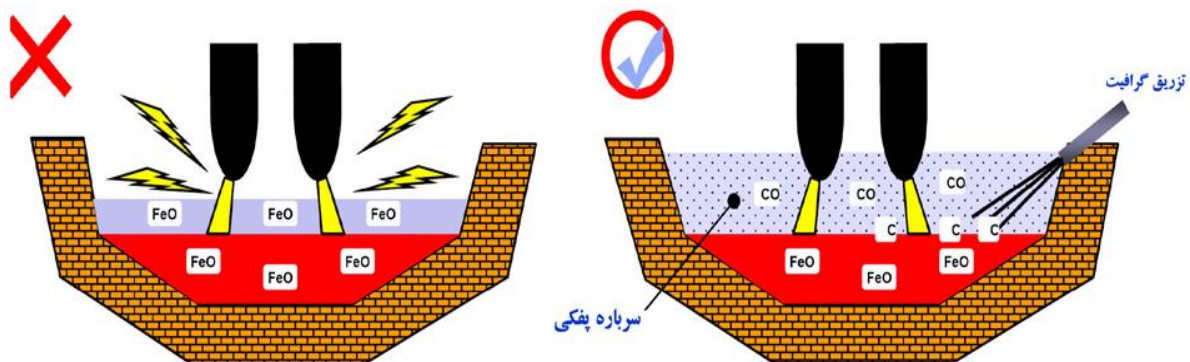
کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش زمان ذوب تا ذوب و کاهش قیمت تولید از مزایای دیگر استفاده از شارژ HDRI جهت تولید فولاد می‌باشد. با توجه به اینکه هدف صنعت فولاد ایران افزایش میزان تولید در سال‌های آینده می‌باشد؛ استفاده از شارژ داغ مواد ورودی به کوره می‌تواند در افزایش نرخ تولید و کاهش قیمت تمام شده فولاد نقش بسزایی داشته باشد.

۳-۳ سرباره پفکی:

استفاده از امولسیون گاز-سرباره-مذاب (پفکی کردن سرباره) مفیدترین و اقتصادی‌ترین عامل کاهش انرژی در کوره‌های EAF است. زیرا در مقایسه با سایر روش‌ها به تجهیزات کمتری نیاز دارد. ایجاد سرباره پفکی در کوره‌های قوس الکتریکی منجر به کاهش مصرف انرژی الکتریکی، کاهش مصرف الکتروود و نسوز، کاهش میزان اکسید آهن موجود در سرباره و در نتیجه راندمان تولید بالاتر می‌شود. 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 آسیب پذیری بیشتر نسوز دیوار کوره می گردد. در این حالت، بهترین و مهم ترین راهکار جلوگیری از آسیب پذیری دیوار کوره تولید سرباره پفکی می باشد.

نیروی محرکه پفکی شدن سرباره، انرژی حباب های CO است که در طول ذوب و تصفیه از واکنش های 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 مولکول های FeO در لایه سرباره را می توان کنترل کننده سینتیک واکنش های تشکیل CO در کوره های قوس الکتریک دانست. پس از تشکیل حباب های CO، این حباب ها از محل تشکیل خود جدا شده، در لایه سرباره به سمت بالا حرکت کرده و زیر لایه سرباره تجمع می یابند. سپس با پیوستن حباب ها به یکدیگر، فیلم سرباره پاره شده و حباب ها خارج می شوند. مجموعه این فرآیند باعث پفکی شدن سرباره می شود. جهت ایجاد سرباره پفکی و حفظ یک ضخامت پفکی برای پوشاندن کامل قوس می توان از تجهیزات جدید دمش هم زمان اکسیژن و پودر کربن استفاده نمود. در چنین حالتی انتقال گرما از قوس به مذاب افزایش می یابد [۱۰، ۱۳]. شماتیک ایجاد سرباره پفکی و پوشاندن قوس الکتریکی در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



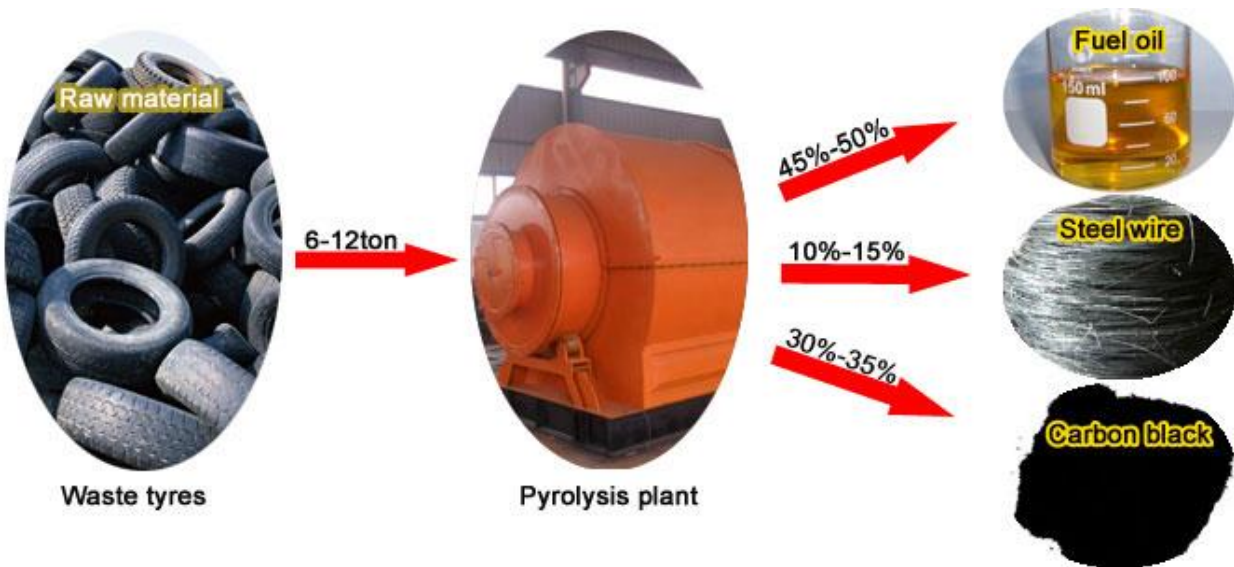
شکل ۱۹: شماتیک ایجاد سرباره پفکی و پوشاندن قوس الکتریکی.

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، بازیسته 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 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 بازیسته سرباره و نقش آن در مصرف انرژی الکتریکی بایستی به این نکته توجه نمود که افزایش بازیسته 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 بازیسته 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 بازیسته 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].

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

۱۰ الی ۱۵ درصد وزن لاستیک‌ها را فولاد پرکربن تشکیل می‌دهد و از طرف دیگر آنالیز شیمیایی قسمت غیرفلزی لاستیک‌ها نشانگر آن است که ترکیب لاستیک، شیه 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 سنگ آهک 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 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. به‌طور 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 سرباره‌زا نیز کمتر می‌شود. زمان افزودن لاستیک‌ها به کوره و محل قرارگیری آن‌ها بر روی بازده آن‌ها جهت کاهش مصرف انرژی تأثیرگذار می‌باشد. به‌طور 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 فناوری ابداع در کوره‌های قوس الکتریکی موجود کشور نزدیک به ۱۱ میلیون حلقه لاستیک فرسوده (معادل ۱۱۰ هزار تن) قابل مصرف است.



شکل ۲۰: مواد حاصله از پیرولیز لاستیک‌های فرسوده.

۳-۵ الکتروُد

استفاده از الکترودهای گرافیتی مصنوعی در فرایندهای EAF به صورت استاندارد و متداول می‌باشد. مواد اولیه مورد استفاده برای تهیه الکتروُد گرافیتی شامل کک نفت و قیر زغال‌سنگ می‌باشد. این دو ماده با یکدیگر مخلوط شده و طی چندین مرحله فرایند در دمای بالا، الکتروُد بدست می‌آید. مراحل پیشرفت تکنولوژی تولید الکتروُد 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 الکتروُد مورد اقبال واقع شده است. همچنین در کوره‌های DC بزرگ با تنها یک الکتروُد، استفاده از الکترودهای بسیار بزرگ الزامی می‌باشد.

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 می توان اظهار داشت که حدود ۸٪ انرژی در الکتروودها مصرف می شود. به همین جهت با استفاده از قطره های بزرگ تر، تلفات الکتریکی را کاهش می دهند؛ ولی خود موجب افزایش تلفات حرارتی می شود. 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 به صورت تشعشعی به محیط خارج انتقال می یابد. بنابراین طراحی بهینه الکتروود نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی در کوره های قوس الکتریکی دارد [۱۰].

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

از ابتدای استفاده از کوره های قوس الکتریکی همواره سعی بر آن بوده است که با به کارگیری انرژی حاصل از احتراق سوخت های فسیلی و واکنش های شیمیایی مربوط به عناصر و جایگزینی آنها بجای انرژی الکتریکی، مصرف برق

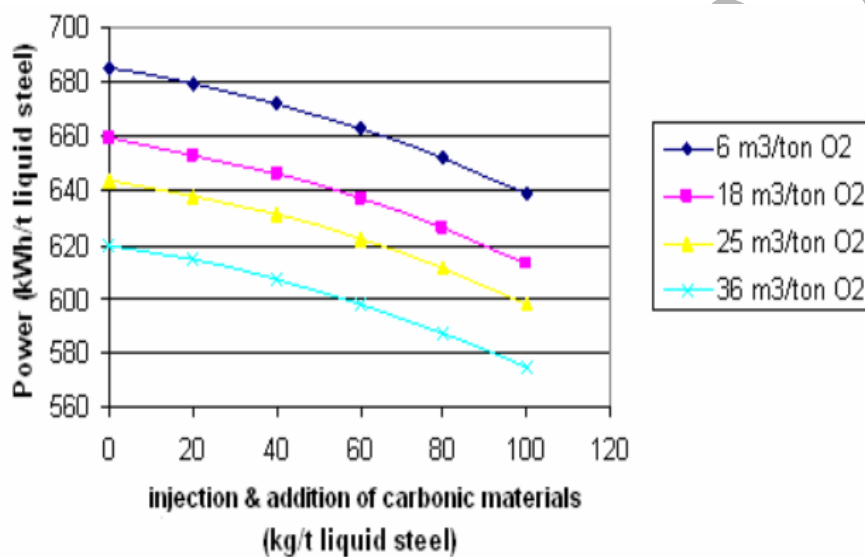
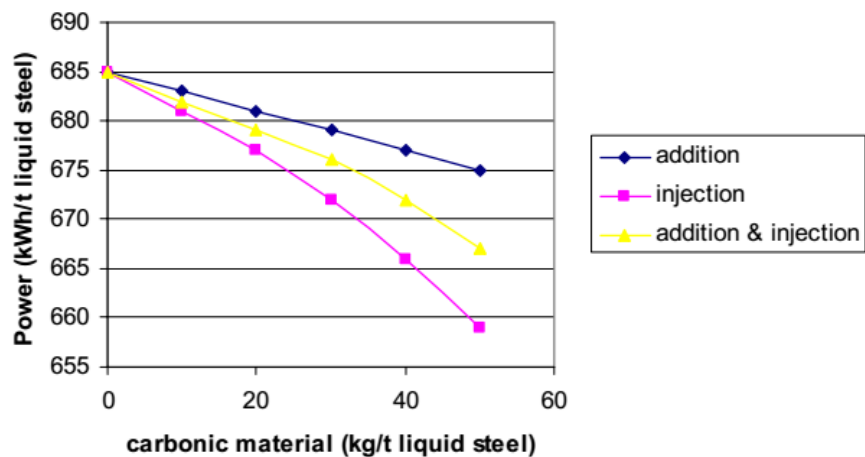
در این کوره‌ها به حداقل برسد. گرمای آزاد شده از واکنش‌های گرم‌زای رخ داده در کوره قوس الکتریکی می‌تواند جایگزین قسمتی از انرژی الکتریکی مصرفی در کوره و در نتیجه کاهش مصرف انرژی الکتریکی شود. در میان انواع واکنش‌های رخ داده در کوره EAF، واکنش کربن و اکسیژن بالاترین میزان گرما را آزاد می‌نماید. آنتالپی واکنش عناصر مختلف در واکنش با اکسیژن در جدول ۴ ارائه شده است.

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

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 می‌توان 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 به شدت 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 به صورت 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 ابداعات جدید در حوزه کوره‌های میدرکس می‌باشد [۲۰]. در شکل ۲۱ نمونه‌ای اثر افزودن کربن به صورت تزریقی و توده‌ای 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 می‌شود که با افزایش مقدار کربن شارژ شده و دبی اکسیژن تزریق شده به کوره، مصرف انرژی الکتریکی کاهش می‌یابد.



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

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 پارامترها مستقیماً بر روی میزان انرژی مصرفی در کوره EAF

تأثیرگذار می‌باشد. سیلیس اصلی‌ترین جز خاکستر بوده که با پوشش حباب‌های CO-CO₂، باعث تعویق احیای اکسید آهن می‌شود. 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 می‌شود. 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 می‌شود. از طرف دیگر میزان تلفات آهن به صورت اکسید آهن افزایش می‌یابد. هر چه مقدار میزان ترکیبات حاوی مواد فرار نظیر 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].

۳-۷- 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.

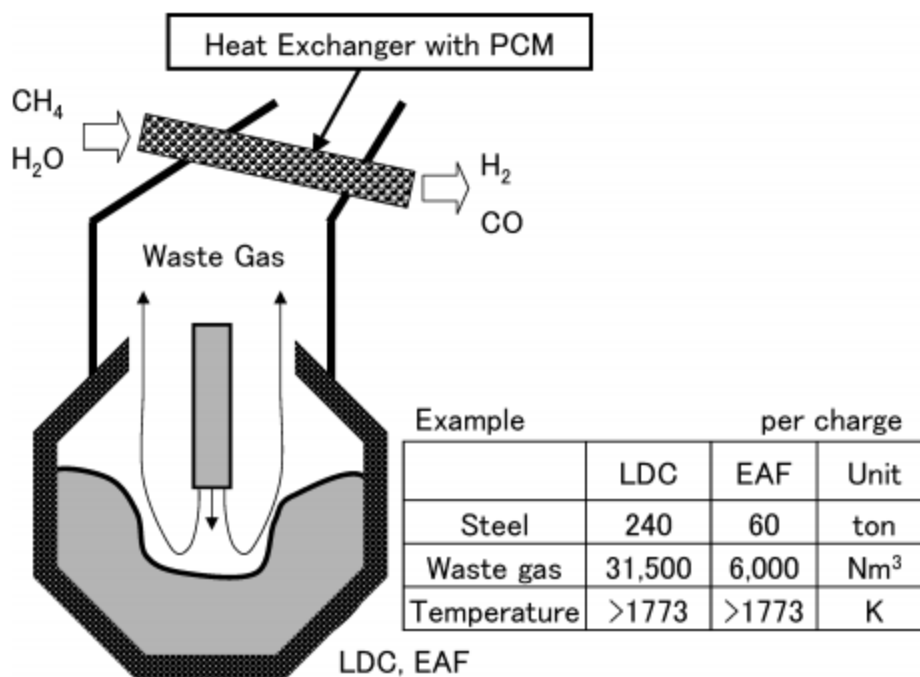
همان‌طور که در بخش ۳-۱ مطرح شد، می‌توان از گازهای خروجی از کوره EAF جهت پیش گرم کردن آهن اسفنجی و قراضه استفاده نمود. همچنین می‌تواند از این انرژی حرارتی بالا جهت تولید بخار استفاده نمود. بخار تولید شده می‌تواند برای راه‌اندازی پمپ‌های محفظه گاز زدایی خلأ، کمپرسورهای پلنت اکسیژن و سیکل تبرید مورد

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 H_2 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^2 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 بالای 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].

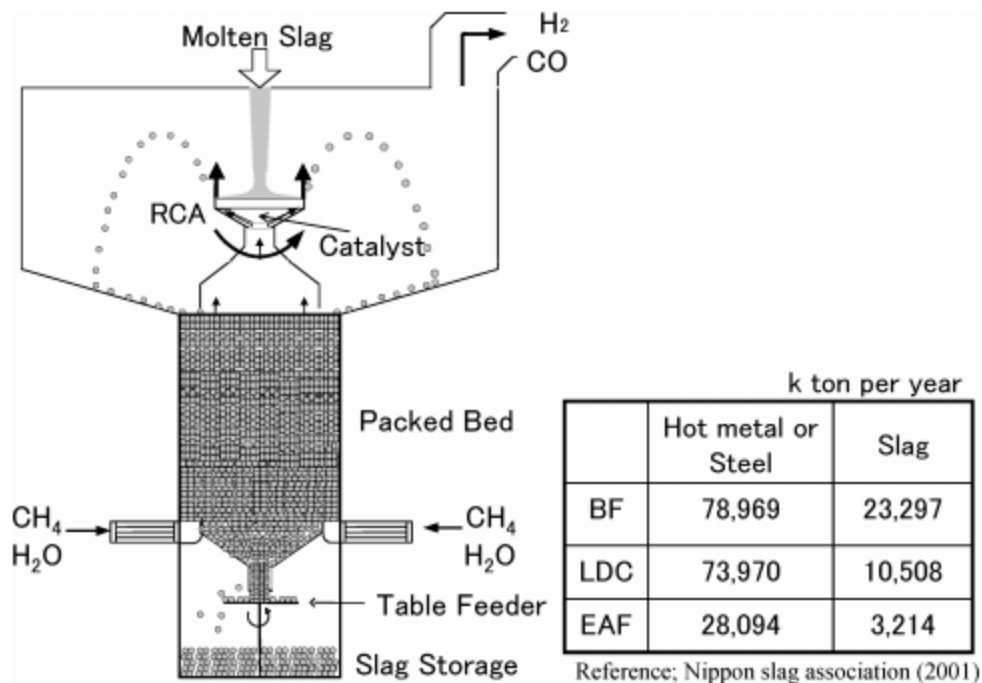
² . Phase Change Material



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

همچنین می‌توان از استفاده از روش RCA^۳ بدون استفاده از آب و با استفاده از انرژی حرارتی اتلافی در کوره‌های 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 نمی‌شود و همچنین آلودگی آب نیز رخ نمی‌دهد. در سیستم RCA، یک بستر ثابت به وسیله سرباره گرانوله شده در زیر RCA ایجاد می‌شود که در شکل ۲۳ نشان داده شده است. برای اینکه بازیابی حرارتی در طول واکنش گرماگیر امکان‌پذیر باشد، متان و آب در قسمت پایینی بستر ثابت تولید می‌شود. بستر ثابت، بخار و متان را پیش گرم کرده و سپس آن‌ها را به هیدروژن و CO تبدیل می‌کند. برای این فرایند از کاتالیست نیکل در پایین RCA استفاده می‌شود [۲۴].

³ . Rotary Cup Atomizer

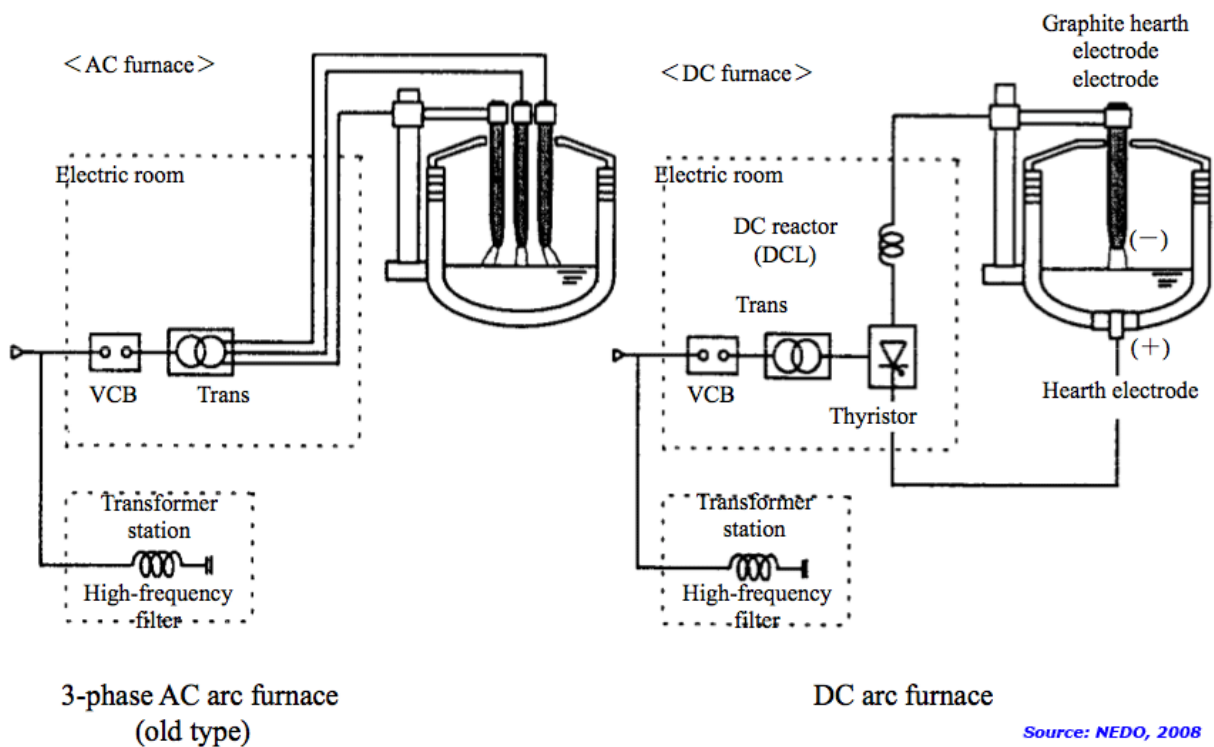


شکل ۲۳: سیستم پیشنهادی برای بازیابی حرارت از سرباره فولادسازی (سیستم RCA) [۲۴].

۳-۸ کوره قوس الکتریکی با جریان مستقیم

یکی از راهکارهای مطلوب جهت کاهش مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی با ساینز بالا استفاده از سیستم جریان مستقیم به جای جریان متناوب می‌باشد. در این حالت تنها یک الکتروود 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 فاز با جریان AC می‌باشد. همچنین کوره‌های قوس DC بازدهی ذوب بالاتر داشته و عمر کاری آن‌ها نیز بیشتر می‌باشد. میزان مصرف الکتروود نیز در کوره‌های DC تقریباً نصف کوره‌های متداول است. این تکنولوژی قابلیت کاهش میزان انتشار گاز CO₂ تا حدود 52.9 Kg CO₂/t-steel را دارد. شماتیکی از دو

کوره قوس الکتریکی AC و DC در شکل ۲۴ نشان داده شده است [۲۳, ۲۵].



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

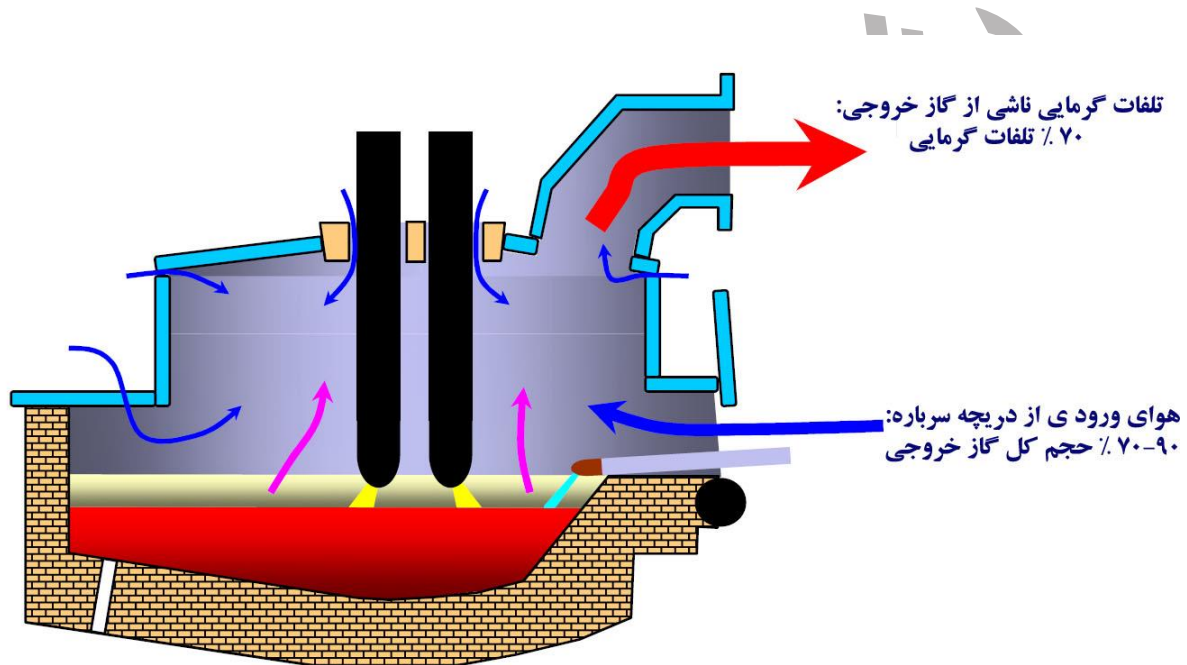
۳-۹ انواع روش‌های مرسوم کاهش مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی

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].

۳-۹-۲ 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].



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

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 آسیب دیدگی 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

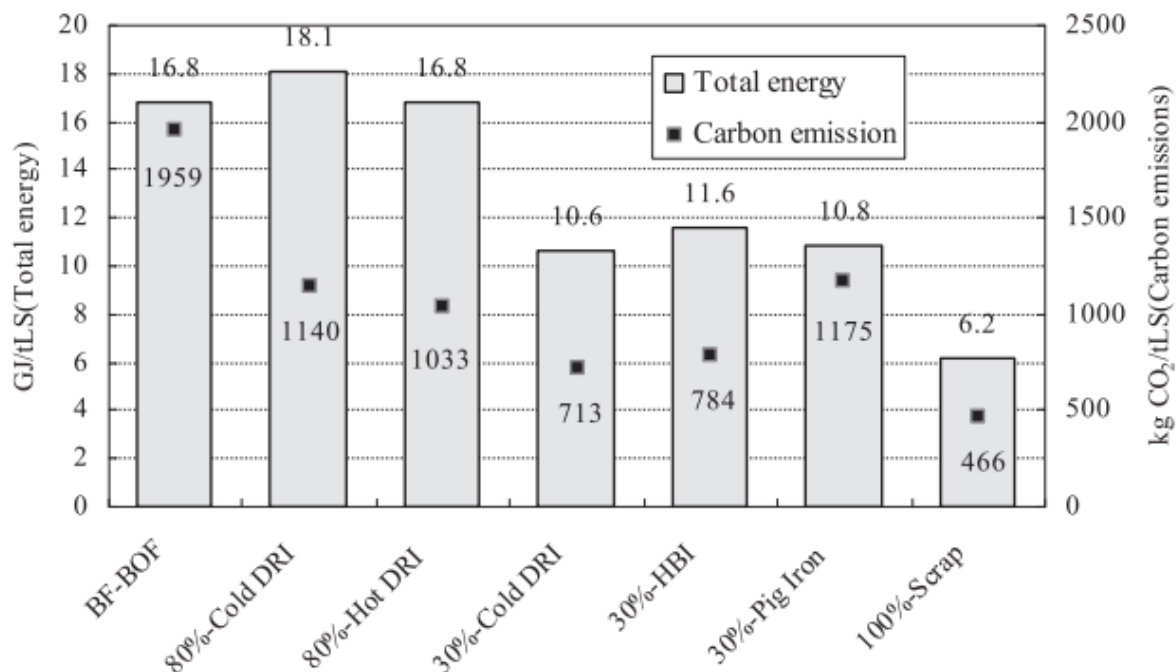
استفاده بیشتر از کامپیوتر برای کنترل فرآیند، باعث بهبود در بهره‌وری شده است. از سیستم‌های کنترل کامپیوتری می‌توان به طور وسیعی برای انجام تعدادی از عملیات بهره‌گرفت که شامل موارد زیر هم می‌گردد: کنترل وضعیت،

محاسبه نیازهای انرژی برای یک (شارژ) مواد خام و کنترل نیروی برق طی یک دوره ذوب و یا برای تقسیم نیروی برق 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 همچنین انتشار گاز CO_2 برای روندهای مختلف تولید فولاد در شکل ؟ 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.



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

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در این پژوهش، استفاده از سیستم‌های مدرن در کوره میدرکس همراه با دمش اکسیژن به منظور افزایش دمای حرارت گاز ورودی به کوره از راهکارهای مناسب جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌باشد. 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 واکنش‌های گرمازا در کوره قوس، ایجاد سرباره پفکی ایده آل و استفاده از لاستیک‌های فرسوده به عنوان منبع کربن می‌تواند از بهترین راهکارها جهت کاهش مصرف انرژی در کوره قوس الکتریکی باشد. جهت امکان‌سنجی استفاده از طرح‌های پیشنهاد شده در این تحقیق در صنعت فولاد ایران، نیاز به مطالعات پایه‌ای و بررسی میزان بازدهی می‌باشد. امید است با انجام مطالعات آینده‌نگاری در زمینه کاهش مصرف انرژی در صنعت فولاد، گام‌هایی اساسی و مؤثر در آینده نزدیک برداشته شود.

- [١]S. Shafiee, E. Topal, When will fossil fuel reserves be diminished?, Energy policy, 37 (2009) 181-189.
- [٢]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.
- [٣]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.
- [٤]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).
- [٥]M. Atsushi, H. Uemura, T. Sakaguchi, MIDREX Processes, Kobelco Technology Review, 29 (2010) 50-57.
- [٦]T. Harada, H. Tanaka, Future steelmaking model by direct reduction technologies, ISIJ international, 51 (2011) 1301-1307.
- [٧]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.
- [٨]B. Sandberg, Undvall, "Energy optimisation of electric arc furnaces by statistical process evaluation", in: 7th European Electric Steelmaking Conference proceedings, 2002, pp. 435-444.
- [٩]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.
- [١٠]B. Lee, I. Sohn, Review of innovative energy savings technology for the electric arc furnace, Jom, 66 (2014) 1581-1594.
- [١١]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.
- [١٢]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.

[۲۷]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 ذوب آهن 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 فخرنوبیری، سید خطیب الاسلام صدر نژاد، مهران خرم‌نیا، یازدهمین کنگره سالانه انجمن 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 خرم‌نیا، یازدهمین کنگره سالانه انجمن 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 پیش‌گرمایش بر کاهش مصرف انرژی، ابراهیم حاجی‌دولو، حمزه دشتی، اولین کنفرانس سراسری اصلاح‌الگوی مصرف انرژی الکتریکی ۱۳۸۸.

"جهت مطالعه مقالات جدید در زمینه صنعت آهن و فولاد و آشنایی با فناوری های نوین صنعت فولاد، به سایت پژوهشکده فولاد مراجعه نمایید."

031-33913921
031-33912588

SteelResearchCenter
SRC.iut.ac.ir

دانشگاه صنعتی اصفهان
SRC@of.iut.ac.ir