

بهینه سازی مصرف انرژی کوره بلند

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: تحلیل پارامترهای موثر بر مصرف انرژی و تولید کوره بلند.....	۸
۱-۱. عوامل برون واحدی.....	۸
۲-۱. عوامل درون واحدی.....	۱۰
۳-۱. مطالعه موردی نحوه اثر گذاری هریک از مشخصه های مؤثر.....	۱۲
فصل دوم: راهکارهای متداول بهینه سازی مصرف انرژی در واحد کوره بلند.....	۱۵
۱-۲. جایگزینی کک با سایر سوخت ها.....	۱۶
۲-۲. تزریق گازهای داغ احیا کننده به کوره بلند.....	۲۳
۱-۲-۲. تاثیر تزریق سوخت فسیلی به کوره بلند بر روی عملکرد آن.....	۲۴
۲-۲-۲. نتایج تزریق HRG به کوره بلند.....	۲۵
۳-۲-۲. مقایسه تزریق HRG و تزریق همزمان HRG و PC.....	۲۸
۳-۲. شارژ آگلومره کامپوزیت کربنی (CCB).....	۳۰
۴-۲. توربین های انبساطی (TRT).....	۳۴
۵-۲. بازیافت گاز کوره بلند.....	۳۵
۱-۵-۲. بازیافت گاز کوره بلند به عنوان سوخت در واحدهای تولیدی کارخانه (کوره بلند، آگلومراسیون، نورد،...).....	۳۶
۲-۵-۲. بازیافت گاز کوره بلند برای تولید برق در نیروگاه بخار و نیروگاه گازی.....	۳۶
۳-۵-۲. بازیافت گاز کوره بلند به عنوان عامل احیا در کوره بلند.....	۳۸
۶-۲. بازیابی حرارت سرباره.....	۳۸
۷-۲. بهینه سازی کاتوپرها.....	۳۸
۱-۷-۲. بازیابی دود خروجی از کاتوپر.....	۳۸
۲-۷-۲. بهبود احتراق در کاتوپر.....	۳۹
۳-۷-۲. بهبود کنترل کاتوپرها.....	۳۹
۸-۲. بهبود سیستم کنترل کوره بلند.....	۴۰
۲-۸-۲. استفاده از سطح ۲ اتوماسیون برای کنترل عملیات کوره بلند [۱۳].....	۴۱
۲-۲-۸-۲. ماژول های نظارتی (Supervisory Module).....	۴۳
۳-۲-۸-۲. ماژول پشتیبان فرایند (PSM).....	۴۳
۴-۲-۸-۲. ماژول بهره برداری (TPM).....	۴۴

۴۵	 ۵-۲-۸-۲. سیستم جریان حرارتی (HFS)
۴۶	 ۶-۲-۸-۲. مازول پیش‌بینی کننده سیلیس (SPM)
۴۶	 ۷-۲-۸-۲. مدل بالانس جرم و انرژی (MHB)
۴۷	 ۸-۲-۸-۲. مدل محاسبات بار (BCM)
۴۷	 ۹-۲-۸-۲. مازول ردیابی بار (BTM)
۴۸	 ۱۰-۲-۸-۲. مدل توزیع بار (BDM)
۴۸	 ۱۱-۲-۸-۲. سیستم مانیتورینگ کوره (HMS)
۴۹	 ۱۲-۲-۸-۲. مانیتورینگ پوشش داخلی کوره (SLM)
۵۰	 ۱۳-۲-۸-۲. مدل کنترل بهینه کاتوپر (SOM)
۵۱	 ۱۴-۲-۸-۲. سیستم کنترل و نظارت اپراتور (OACS)
۵۱	 ۳-۸-۲. کنترل کیفیت چدن مذاب کوره بلند با استفاده از نرم افزار [۱۴]

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱. تاثیر پارامترهای مهم عملیاتی کوره بر روی نرخ تولید و مصرف انرژی [۱]	۱۳
جدول ۱-۲. میزان کاهش دمای شعله در اثر تزریق سوخت‌های مختلف به کوره بلند	۲۴
جدول ۲-۲. مشخصات کوره بلند مورد نظر برای شبیه سازی بر اساس تزریق HRG	۲۵
جدول ۳-۲. تاثیر تزریق HRG بر روی عملکرد کوره بلند بر اساس نتایج شبیه سازی	۲۷
جدول ۴-۲. تاثیر تزریق همزمان HRG و PC بر عملکرد کوره بلند بر اساس نتایج شبیه سازی	۳۰
جدول ۵-۲. مشخصات کوره بلند مورد نظر برای شبیه سازی شده بر اساس استفاده از CCB	۳۱
جدول ۶-۲. ساختار CCB و زینتر (درصد جرمی)	۳۱
جدول ۷-۲. مشخصات فیزیکی CCB و زینتر	۳۲
جدول ۸-۲. بالانس انرژی کوره بلند در مقادیر مختلف شارژ CCB (GJ/THM)	۳۳
جدول ۹-۲. توربین‌های گازی با سوخت گاز کوره (محصولات شرکت میتسوبیشی)	۳۷

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۶	شکل ۱-۲. اقدامات موثر در جهت کاهش مصرف کک کوره بلند در کشور آلمان [۶]
۱۷	شکل ۲-۲. شماتیک تزریق پودر زغال به فرم‌های کوره بلند [۸]
۱۸	شکل ۳-۲. روند تزریق زغال و کاهش مصرف کک در کوره بلندهای ژاپن [۹]
۱۸	شکل ۴-۲. تاثیر افزودن پودر زغال بر مصرف کک
۱۹	شکل ۵-۲. تجهیزات مورد استفاده در تکنولوژی PCI [۸]
۲۱	شکل ۶-۲. شماتیک تزریق پلاستیک به فرم‌های کوره بلند [۵]
۲۲	شکل ۷-۲. تاثیر تزریق سوخته‌های مختلف بر مصرف ویژه کک
۲۲	شکل ۸-۲. تاثیر تزریق سوخته‌های مختلف بر مصرف ویژه هوای دمشی
۲۳	شکل ۹-۲. تاثیر تزریق سوخته‌های مختلف بر انرژی شیمیایی گاز کوره بلند
۳۲	شکل ۱۰-۲. تاثیر استفاده از CCB بر روی سطوح دمایی داخل کوره بلند
۳۳	شکل ۱۱-۲. تاثیر استفاده از CCB بر روی مشخصه‌های کاری کوره بلند
۳۵	شکل ۱۲-۲. تولید برق با استفاده از TRT به روش مرطوب [۱۰]
۳۵	شکل ۱۳-۲. تولید برق با استفاده از TRT به روش خشک [۱۰]
۳۷	شکل ۱۴-۲. تولید همزمان برق و حرارت با استفاده از گاز کوره بلند [۱۲]
۳۹	شکل ۱۵-۲. روش اجرایی پیشگرم نمودن سوخت و هوای احتراق در کائوپر [۱۰]
۴۱	شکل ۱۶-۲. ارتباط سطوح کنترلی کوره بلند [۸]
۴۲	شکل ۱۷-۲. ماژول‌های کنترلی در سیستم سطح ۲ اتوماسیون کوره بلند
۴۲	شکل ۱۸-۲. نحوه ارتباط سطح ۲ اتوماسیون با سطح ۱ اتوماسیون و اپراتور
۴۳	شکل ۱۹-۲. ماژول‌های مختلف در سطح ۲ اتوماسیون کوره بلند
۴۵	شکل ۲۰-۲. نمونه‌ای از صفحات نمایش ماژول بهره‌برداری
۴۶	شکل ۲۱-۲. نمونه‌ای از صفحات نمایش سیستم جریان حرارتی
۴۸	شکل ۲۲-۲. نمونه‌ای از خروجی مدل توزیع بار
۴۹	شکل ۲۳-۲. نمونه‌ای از خروجی سیستم مانیتورینگ کوره

- ۵۰ شکل ۲-۲۴. نمونه‌ای از خروجی مدل کنترل بهینه کاتوپر
- ۵۳ شکل ۲-۲۵. اعتبارسنجی مدل تهیه شده برای مشخصات چدن مذاب ■ : داده‌های واقعی، - : پیش‌بینی مدل
- ۵۴ شکل ۲-۲۶. اعتبارسنجی مدل تهیه شده برای مشخصات سرباره ■ : داده‌های واقعی، - : پیش‌بینی مدل

چکیده

از بدو تولید صنعتی آهن و چدن، بیش از ۶۰۰ سال، کوره بلند بعنوان روش اصلی تولید آهن خام مطرح بوده است. اگرچه پیشرفتهای چشمگیری در جهات مختلف، بخصوص کاهش مصرف کک، افزایش بازدهی و طراحی کوره بلند هایی با ظرفیتهای بالاتر صورت گرفته است، ولی اصول کار کوره بلند به همان صورت اولیه دست نخورده باقی مانده است. در این روش مواد آهن دار مانند سنگ آهن همراه با کک و مواد سرباره ساز (به صورت کلوخه یا گندله) از بالای کوره شارژ شده و هوای پیشگرم شده از پایین کوره دمیده می شود. در اثر سوختن کک در پایین کوره، حرارت کافی و فشار مناسب برای احیا سنگ آهن و ذوب شدن آهن و سرباره ایجاد می شود.

کوره بلند بزرگترین مصرف کننده انرژی در یک کارخانه تولید فولاد به روش بازی اکسیژنی می باشد. به همین دلیل بررسی عملکرد آن به لحاظ مصرف انرژی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. گزارش حاضر در دو فصل آماده شده است. در فصل اول گزارش عوامل موثر بر مصرف انرژی کوره بلند شامل عوامل درون واحدی و برون واحدی مورد بررسی قرار گرفته و در فصل دوم آن به ارائه راهکارهایی در جهت کاهش مصرف انرژی کوره بلند پرداخته شده است.

فصل اول

تحلیل پارامترهای موثر بر

مصرف انرژی و تولید کوره بلند

پارامترهای متعددی بر رانندگی واحد کوره بلند و در نتیجه نرخ بهینه مصرف سوخت این واحد اثر گذار است. این عوامل را می توان به دو گروه عوامل برون و درون واحدی تقسیم کرد. در ادامه اثر این عوامل با توجه به نتایج موازنه جرم و انرژی یک واحد کوره بلند ارائه شده است. شایان ذکر است در بررسی عوامل موثر بر مصرف ویژه انرژی یک واحد باید به این نکته توجه داشت که تمامی پارامترهای موثر به صورت مستقیم یا غیر مستقیم بر یکدیگر نیز تاثیرگذار می باشند (به عنوان مثال عوامل درون واحدی مربوط به هوای دم تحت تاثیر به عوامل برون واحدی کیفیت مواد خام و کک می باشند). با این حال در این قسمت سعی شده است در مورد پارامترهای موثر بر مصرف انرژی واحد کوره بلند به صورت مستقل از یکدیگر بحث شود.

۱-۱. عوامل برون واحدی

▪ میزان اتلاف گاز کوره بلند در شبکه

مقدار مصرف انرژی یک واحد کوره بلند حاصل تفاضل انرژی تولیدی از انرژی مصرفی در این واحد می باشد. با توجه به اینکه خالص انرژی تولیدی این واحد (گاز تولیدی کوره بلند منهای انرژی تلف شده در مشعل و اتلافات شبکه گاز رسانی) در تعیین مقدار مصرف انرژی واحد مؤثر است، هرچه میزان گاز کوره بلند صادراتی به سایر واحدها بهینه تر مصرف شود میزان شدت مصرف واحد کوره بلند بهینه تر خواهد بود.

▪ آماده سازی مواد خام

کیفیت مواد آهن دار شارژ شده به کوره با معرفی روشهای کلوخه سازی سنگ آهن (آگلومراسیون و گندله سازی) به دلیل ارتقاء کیفیت تماس گاز احیائی و مواد جامد و همچنین کنترل ترکیب شیمیایی و میزان آهن بار ورودی به طور چشمگیری افزایش یافته است. از آنجائیکه میزان احیاء سنگ آهن در اثر اکسید شدن کربن به CO_2 تقریباً دو برابر CO می باشد بهینه شدن تماس گاز-جامد باعث کاهش میزان کربن مورد نیاز جهت احیاء اکسیدهای آهن می گردد. بنابراین افزایش کیفیت مواد آهن دار شارژ، باعث افزایش رانندگی کوره و به تبع آن کاهش مصرف انرژی آن می شود. [۱]

▪ کیفیت کک

کک به عنوان مهمترین عنصر کاهنده در فرآیند کوره دو نقش اساسی تحمل بار کوره و فراهم کردن مسیر عبور گاز

احیائی از میان بار را نیز برعهده دارد. لذا افزایش پایداری کک باعث ارتقاء کیفیت تماس گاز احیائی و مواد خام و در نتیجه افزایش راندمان مصرف انرژی کوره می گردد. از طرف دیگر افزایش میزان خاکستر کک به دو دلیل میزان مصرف انرژی کوره را افزایش می دهد. اول اینکه محتوی کربن به عنوان عنصر کاهنده کاهش می یابد و دیگر اینکه خاکستر آن بایستی در کوره ذوب و به عنوان سرباره از آن خارج گردد که این فرایند باعث اتلاف انرژی در کوره بلند می گردد.

در حین نزول کک از سطح بار به مناطق پایین کوره، کلوخه های کک با گاز CO_2 در حال صعود، وارد واکنش می شوند و همزمان با آن بر اثر سایش کلوخه های کک با یکدیگر و سایش با دیواره های کوره تضعیف می گردند. در اثر تغییر شرایط دمایی، شیمیایی و مکانیکی در طول ارتفاع کوره، کلوخه های کک دچار فروپاشی می شوند. عامل اصلی متلاشی شدن کلوخه های کک در جلوی فورم ها، افزایش تنش حرارتی در این منطقه از کوره است، در حالی که از هم پاشیدگی کلوخه های کک در دیگر مناطق کوره متاثر از میزان واکنش پذیری کربن کک با گاز CO_2 و استحکام بعد از واکنش کک می باشد.

میزان کیفیت کک و تاثیر آن بر پارامترهای عملیاتی کوره بلند به کمک دو شاخص مهم CRI^1 و CSR^2 بیان می شود. شاخص CRI معرف میزان ری اکتیویته کک (واکنش پذیری کربن کک با گاز CO_2) و شاخص CSR معرف میزان استحکام کک بعد از واکنش می باشد. بافت و ساختار کربن در کک، تخلخل و ترکیب شیمیایی خاکستر و وجود آهن و عناصر قلیایی مانند سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در خاکستر کک تاثیر بسزایی بر میزان شاخص CRI کک دارند.

تفسیر شاخص های CRI و CSR در تعیین پارامترهای عملیاتی کوره بلند مورد استفاده قرار می گیرد. افزایش شاخص CSR ، علاوه بر جلوگیری از فروپاشی کک در کوره بلند سبب بهبود نفوذپذیری گاز احیا، افزایش راندمان کوره و کاهش میزان مصرف کک می گردد. در صورتی که افزایش شاخص CRI ، به دلیل تضعیف کک در حین نزول از سطح بار به سمت فورم ها، باعث کاهش نفوذپذیری گاز احیا، بروز اختلال در عملکرد کوره خصوصا در منطقه خمیری و کاهش نرخ تولید چدن می گردد. طبق تحقیقات انجام شده در خصوص ارتباط بین شاخص های مقاومت گرم کک مشخص گردیده است که تغییر شاخص های CRI و CSR با یکدیگر به شکل معکوس می باشد. مقدار بهینه این دو شاخص به مشخصات کوره بلند، شرایط عملکرد و برنامه تولید آن دارد. [۲]

مقادیر بهینه برای این دو شاخص برای استفاده کک در کوره بلند، مقادیر بزرگتر از ۶۰ برای CSR و مقادیر کوچکتر از ۲۵ برای CRI می باشد. [۳]

کاهش CSR به میزان ۱ واحد سبب افزایش کک به میزان ۷/۳ کیلوگرم کک به ازای تولید یک تن چدن مذاب و

¹ Cock Reactivity Index

² Coke Strength after Reaction With CO_2

افزایش ۱ درصدی در خاکستر کک که عاملی تاثیرگذار بر شاخص CRI می باشد، سبب افزایش کک به میزان ۱۳/۶ کیلوگرم کک به ازای تولید یک تن چدن مذاب خواهد شد. [۱]

شایان ذکر است در حال حاضر عمده کک مورد نیاز واحد کوره بلند به دلیل مشکلات واحد کک سازی (تخریب باطری یک جهت نوسازی و تاخیر در راه اندازی باطری سه) از خارج از کشور خریداری می شود. بنابراین توجه به کیفیت کک خریداری شده از لحاظ پایداری و ترکیب شیمیایی می تواند بر میزان تولید و شدت مصرف انرژی واحد کوره بلند بسیار تاثیرگذار باشد.

۲-۱. عوامل درون واحدی

▪ مواد سرباره ساز خام

واکنش تکلیس مواد خام سرباره ساز مانند دولومیت و سنگ آهک در کوره به خاطر گرماگیر بودن میزان زیادی از انرژی آن را تلف می کند. این واکنش همچنین با آزاد کردن دی اکسید کربن غلظت گاز کوره تولیدی را کاهش می دهد. امروزه با استفاده از شارژ آگلومره یا گندله محتوی سرباره ساز کلسینه و یا شارژ سرباره کنورتور به کوره بلند از این اتلاف در کوره جلوگیری می شود.

▪ ترکیب شیمیایی چدن مذاب

دو مشخصه اصلی ترکیب شیمیایی چدن مذاب میزان سیلیس و گوگرد آن می باشد. میزان سیلیس مشخص می کند که چه میزان سیلیکا در کوره احیا شده است. از آنجاییکه احیای اکسید سیلیس (سیلیکا)، انرژی بیشتری از احیای اکسید آهن نیاز دارد (در حدود چهار برابر)، افزایش بیش از اندازه میزان سیلیس در چدن مذاب نشان دهنده اتلاف انرژی در کوره می باشد. افزایش یک درصدی سیلیس در چدن مذاب باعث افزایش نرخ مصرف کک به میزان ۶ کیلوگرم به ازای تولید یک تن چدن مذاب خواهد شد. میزان گوگرد مذاب عمدتاً از طریق قلیابیت (بازیسیته^۱) سرباره تنظیم می شود. افزایش بازیسیته غالباً از طریق اضافه کردن سرباره ساز به کوره صورت می پذیرد که این امر باعث افزایش میزان سرباره و همچنین افزایش واکنش تکلیس میگردد. هر دو نتیجه ذکر شده اتلاف انرژی در کوره را به همراه می آورد.

نتایج موازنه انرژی نشان می دهد که افزایش ۱ درصدی در میزان سیلیس و گوگرد چدن مذاب به ترتیب سبب افزایش مصرف انرژی به میزان ۶۷۵ و ۲۲۱ کیلوکالری به ازای تولید یک تن چدن مذاب خواهد شد. [۱]

▪ میزان سرباره تولیدی

سرباره تولیدی کوره بلند، قابلیت استفاده به عنوان محصولات فرعی در صنایع دیگر مانند سیمان را دارد، اما به

¹ Basicity

دلیل این که محصول اصلی واحد کوره بلند چدن مذاب است و معمولاً از سرباره کوره به طور مطلوب استفاده نمی‌شود. عملاً انرژی صرف شده جهت تولید و ذوب سرباره به عنوان یکی از اتلافات کوره شناخته می‌شود. بنابراین کاهش میزان سرباره تولیدی منجر به کاهش مصرف انرژی کوره می‌گردد. با افزایش ۱ کیلوگرم سرباره به ازای تولید یک تن چدن مذاب، مصرف کک به میزان ۰/۲۵ کیلوگرم افزایش خواهد داشت. [۱]

نتایج موازنه انرژی نشان می‌دهد که افزایش ۱ درصدی در میزان سرباره تولیدی سبب افزایش مصرف انرژی به میزان ۴۲ کیلوکالری به ازای تولید یک تن چدن مذاب خواهد شد.

▪ شارژ قراضه

مقایسه مجموع انرژی مورد نیاز جهت احیاء هماتیت به آهن و ذوب آن، با انرژی مورد نیاز تنها جهت ذوب آن، مزیت شارژ قراضه به کوره بلند را به خوبی نشان می‌دهد. سهم فرآیند ذوب حدود ۱۶ درصد از کل انرژی مورد نیاز را تشکیل می‌دهد. بنابراین شارژ میزان کمی قراضه به کوره بلند باعث کاهش چشمگیر نرخ کک کوره می‌گردد. شایان ذکر است اضافه کردن اکسیدهای آهنی که به صورت جزئی احیا شده (مگنتیت یا وستیت)، کاهش میزان انرژی مصرفی کوره را به دنبال دارد. این موضوع به دلیل افزایش ارزش حرارتی گاز تولیدی کوره در اثر خروج گاز احیائی در قسمت بالایی کوره بدون انجام دخالت در مراحل کاهش هماتیت است. [۱]

▪ میزان اکسیژن هوای دم

در جاییکه حجم هوای دمشی به کوره یک فاکتور محدود کننده است اضافه کردن اکسیژن به هوای دم با فرض نرخ اکسیژن ثابت (مترمکعب اکسیژن بر تن مذاب) جهت انجام واکنش در کوره، می‌تواند نرخ هوای دم مورد نیاز کوره (مترمکعب هوای دمشی بر تن مذاب) را کاهش دهد. کاهش نرخ هوای دم مورد نیاز، دبی حجمی دمنده‌های هوا (و در نتیجه انرژی مورد نیاز آنها) و همچنین میزان سوخت مصرفی جهت گرم کردن هوای دم در کاتوپرها را کاهش می‌دهد. به علاوه کاهش حجم هوای دمشی مورد نیاز و در نتیجه کاهش گاز خنثای نیتروژن در گاز کوره، باعث افزایش ارزش حرارتی گاز کوره و به تبع آن بهینه شدن مصرف انرژی در مصرف کننده‌های آن می‌گردد. شایان ذکر است افزایش اکسیژن به هوای دمشی همچنین باعث افزایش میزان گاز احیائی و افزایش قابلیت تزریق هیدروکربن ها در توئیرها^۱ با دمای شعله ثابت می‌گردد. [۱]

▪ دما و رطوبت هوای دمشی گرم

افزایش دمای هوای دمشی خروجی از کاتوپرها به سبب افزایش گرمای محسوس ورودی به کوره باعث افزایش نرخ تولید و کاهش نرخ کک کوره می‌گردد. با این وجود افزایش بیش از اندازه دما باعث ایجاد اختلالاتی در روند حرکت بار و

^۱ Tuyère

گاز در کوره می‌گردد. به طور کلی با افزایش دمای هوای دمشی در فرمها در محدوده مجاز (بسته به کیفیت کک، مواد آهن دار، نحوه توزیع بار، میزان تزریق گاز طبیعی، بخار و اکسیژن) نرخ مصرف کک کاهش می یابد. از طرف دیگر افزایش میزان رطوبت هوای دم با توجه به گرمای مورد نیاز جهت تبخیر آب و واکنش کربن و آب در نزدیک فرمها انرژی مورد نیاز کوره را افزایش میدهد. [۱]

به طور تقریبی به ازاء افزایش هر یک گرم بر نرمال متر مکعب رطوبت هوای دم نرخ مصرف کک کوره به میزان $0/8$ کیلوگرم بر تن چدن افزایش می یابد. از طرفی افزایش دمای هوای دمشی به میزان 1 درجه سانتیگراد سبب کاهش مصرف کک به میزان $0/18$ کیلوگرم به ازای تولید یک تن چدن مذاب خواهد شد.

▪ میزان تزریق هیدروکربنها

تزریق هیدروکربنها در فرمها به دو دلیل کنترل دمای هوای دمشی و کاهش کک مورد نیاز کوره صورت می گیرد. لازم به ذکر است کاهش نرخ کک به دلیل تزریق هیدروکربنها (به عنوان مثال گاز طبیعی) تنها باعث تغییر نوع انرژی ورودی به کوره میگردد و در انرژی خالص مورد نیاز کوره تاثیری ندارد.

۳-۱. مطالعه موردی نحوه اثر گذاری هریک از مشخصه های مؤثر

به منظور توضیح بیشتر موارد اشاره شده، از یک مدل برای کوره بلند استفاده شده است. به این ترتیب که در هر مرحله یکی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد کوره تغییر و تاثیر آن بر روی نرخ مصرف کک، میزان تولید و سایر پارامترهای عملکردی کوره تحلیل شده است. نتایج این مدل در جدول ۱-۱ ارائه شده است.

جدول ۱-۱. تاثیر پارامترهای مهم عملیاتی کوره بر روی نرخ تولید و مصرف انرژی [۱]

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9
NTHM per day	2477	4351	4464	4525	4723	5976	5241	5688	6100
Wind Rate MSCFM	100.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0
Wind MSCFM/NTHM	58.1	53.0	51.6	50.9	48.5	46.3	44.0	40.5	37.8
Scrap lb/NTHM	0	0	0	0	0	0	0	0	200
Lump Ore lb/NTHM	3280	0	0	0	0	0	0	0	0
Pellets lb/NTHM	0	3002	3002	1960	1960	1974	1974	1974	1682
Sinter lb/NTHM	0	0	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Raw Flux lb/NTHM	700	350	0	0	0	0	0	0	0
Blast O2 %	21	21	21	21	21	21	21	23	23
Blast Temp. F	1500	1500	1500	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Moist gr/scf	6	6	6	17	6	6	6	6	6
RAFT deg F	3775	3775	3775	4021	3763	3767	3753	3739	3752
Coke lb/NTHM	1395	1287	1254	1238	1086	1025	969	918	846
Oil lb/NTHM	0	0	0	0	100	100	100	150	150
Total lb/NTHM	1395	1287	1254	1238	1186	1125	1069	1068	996
Hot Metal [Si] %	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50
Hot Metal [S] %	0.029	0.029	0.026	0.026	0.026	0.03	0.028	0.028	0.018
Slag lb/NTHM	742	432	511	509	500	519	515	512	488
Slag B/A	1.14	2.02	1.13	1.13	1.13	1.17	1.08	1.10	1.20
BFG BTU/scf	83.7	83.1	84.4	87.5	89.0	85.5	79.3	87.1	88.1
BFG MMBTU/NTHM	6.84	6.38	6.19	6.44	6.34	5.59	4.86	5.13	4.89
Efficiency %	38.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	46.0	46.0	46.0

نتایج ارائه شده در جدول ۱-۱، در این بخش تحلیل شده است.

➤ مورد ۱

بار ورودی صرفاً سنگ آهن و دمای هوای دمشی نسبتاً پایین است. تزریق سوخت در توئیرها صورت نمی‌گیرد. در این حالت راندمان کوره به دلیل تماس کم بین مواد جامد و گاز، نسبتاً پایین است. همچنین مقدار مجاز حجم هوای دمشی محدود می‌باشد.

➤ مورد ۲

بدون هیچ تغییری در پارامترهای عملیاتی، در بار ورودی به کوره به جای سنگ آهن، گندله شارژ می‌شود که منجر

به افزایش بیش از حد مجاز بازیسیته سرباره خواهد شد. (به دلیل مواد بازی موجود در گندله) برای کاهش میزان بازیسیته، مقدار مواد سرباره ساز به نصف کاهش داده می شود. در این صورت حجم تولید به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد که دلیل آن افزایش حجم مجاز هوای دمشی به دلیل بهبود کیفیت بار می باشد. در این حالت نرخ مصرف کک به سه دلیل کاهش میزان مواد سرباره ساز، کاهش حجم سرباره و افزایش راندمان کوره بلند کاهش می یابد.

➤ مورد ۳

بار ورودی به کوره شامل گندله و آگلومره است. به این ترتیب مواد سرباره ساز از بار ورودی به کوره حذف خواهد شد. در این حالت نرخ مصرف کک کاهش و میزان تولید افزایش می یابد.

➤ مورد ۴

در صورت افزایش دمای هوای دمشی، به منظور ثابت نگه داشتن دمای شعله در منطقه Raceway، میزان رطوبت هوای دمشی باید افزایش یابد. با افزایش رطوبت هوای دم، ارزش حرارتی گاز کوره به دلیل افزایش محتوای هیدروژن آن افزایش می یابد.

➤ مورد ۵

تزریق نفت به جای افزایش رطوبت هوای دمشی به منظور تثبیت دمای شعله، سبب کاهش نرخ مصرف کک به میزان قابل توجهی خواهد شد.

➤ مورد ۶

کاهش میزان سیلیس در چدن مذاب باعث کاهش نرخ مصرف کک و تغییر بازیسیته سرباره خواهد شد.

➤ مورد ۷

بهبود سیستم تجهیزات توزیع بار سبب کاهش قابل توجه کک مصرفی و کاهش حجم گاز کوره تولیدی خواهد شد.

➤ مورد ۸

افزایش درصد اکسیژن هوای دم و تزریق نفت به منظور ثابت ماندن دمای شعله، سبب افزایش نرخ تولید خواهد شد. در این حالت ارزش حرارتی گاز کوره به دلیل کاهش درصد نیتروژن هوای دم، افزایش می یابد.

➤ مورد ۹

شارژ قراضه به جای گندله، سبب کاهش انرژی مورد نیاز و افزایش نرخ تولید خواهد شد. نهایتاً با اعمال همه این تغییرات می توان نرخ تولید چدن مذاب را تا دو برابر افزایش داد.

فصل دوم

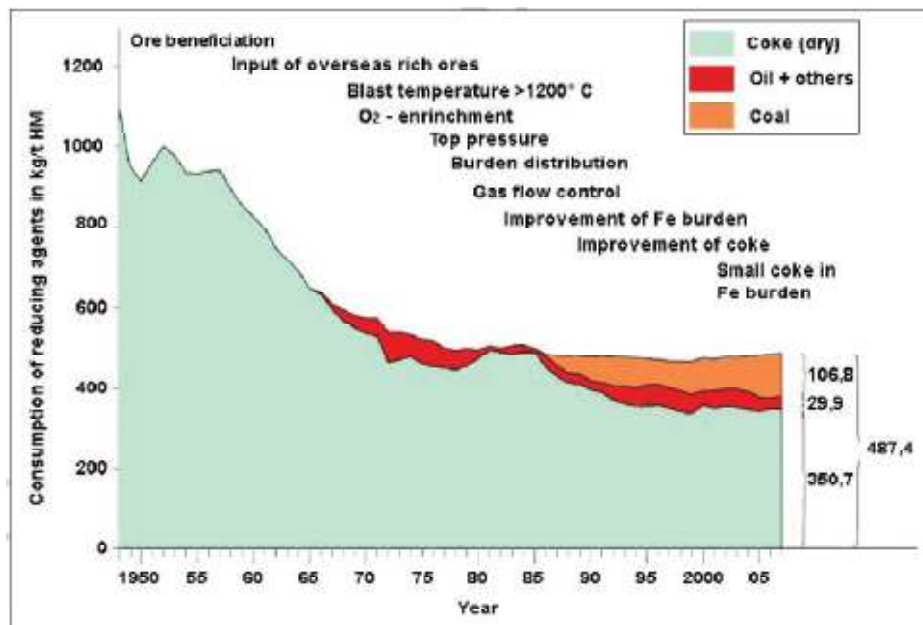
راهکارهای متداول

بهینه سازی مصرف انرژی در واحد کوره بلند

با توجه به اینکه واحد کوره بلند غالب ترین روش تولید آهن مذاب در جهان بوده، همواره در بحث مدیریت انرژی مورد توجه بوده است. هدف اصلی در مدیریت انرژی واحد کوره بلند، کاهش مصرف کک می باشد. کاهش نرخ مصرف کک از ابتدای پیدایش کوره بلند مطرح بوده است. نرخ مصرف کک در کوره بلند از ۸۰۰ کیلوگرم به ازای تولید یک تن چدن مذاب در سال ۱۹۶۰ به کمتر از ۴۷۰ در سال ۱۹۹۹ رسیده و تا ۳۴۰ نیز کاهش داشته است. نرخ متوسط مصرف کک در کوره بلندهای اروپا در سال ۱۹۹۸، ۳۶۴ کیلوگرم به ازای تولید یک تن و مینیمم مقدار آن تاکنون ۲۸۶ کیلوگرم به ازای تولید یک تن بوده است. [۴]

از راه های اصلی در جهت کاهش مصرف انرژی در کوره بلند می توان به استفاده از سوخت های جایگزین کک، افزایش دمای هوای دمشی، غنی سازی هوای دمشی با اکسیژن، افزایش فشار در قسمت بالایی کوره، تزریق گازهای احیاکننده و سیرکوله کردن گاز کوره بلند در داخل کوره اشاره نمود. [۵]

در سال های اخیر تلاش های فراوانی برای کاهش مصرف کک در واحد کوره بلند انجام شده است. در شکل ۱-۲ روند مصرف کک در کوره بلندهای آلمان در دهه های اخیر و تدابیر اتخاذ شده برای کاهش مصرف آن ارائه شده است.



شکل ۱-۲. اقدامات موثر در جهت کاهش مصرف کک کوره بلند در کشور آلمان [۶]

۱-۲. جایگزینی کک با سایر سوخت‌ها

یکی از راهکارهای مهم کاهش مصرف انرژی در صنعت فولاد جایگزینی بخشی از کک مصرفی در کوره بلند با منابع هیدروکربنی با استفاده از تزریق سوخت در فرم‌های کوره بلند می‌باشد.

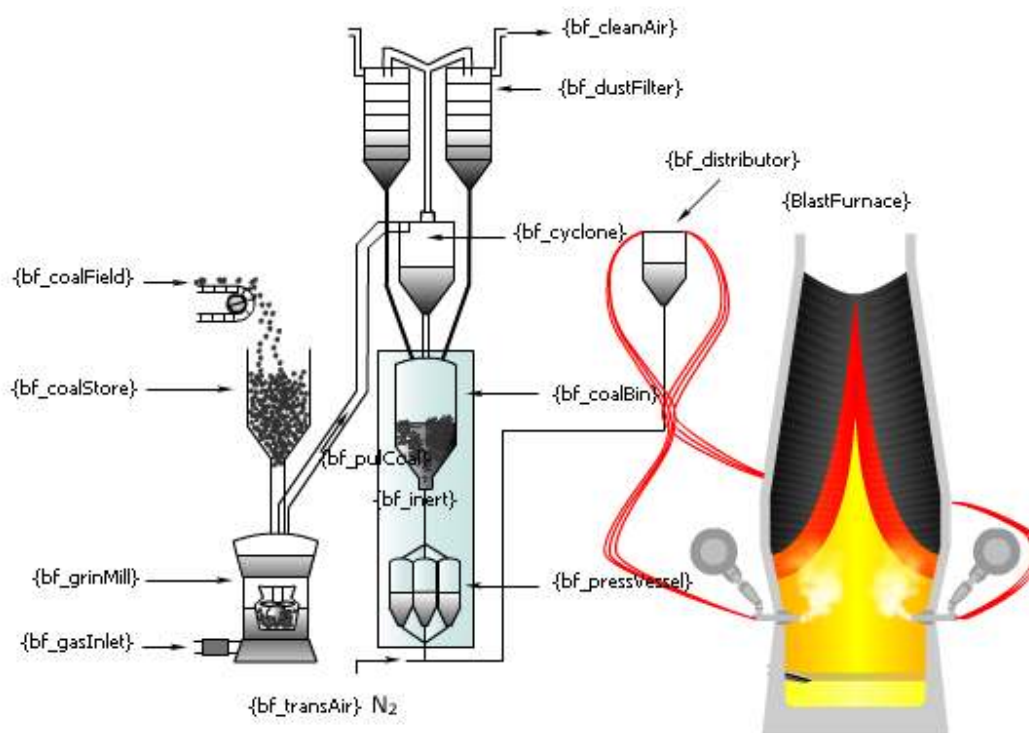
با استفاده از این روش می‌توان نیاز به مصرف کک در کوره بلند و در نتیجه میزان آلودگی را کاهش داد. باید توجه داشت که برای عملکرد مناسب کوره بلند استفاده از حجم مشخصی از کک ضروری است که میزان آن به کیفیت کک، هندسه کوره بلند و شرایط عملیاتی کوره وابسته است. کک علاوه بر اینکه ظرفیت مورد نیاز برای نگهداشتن بار کوره بلند را تامین می‌نماید، باعث نفوذ کافی گاز در کوره نیز می‌شود. به همین دلیل میزان کاهش مصرف کک در کوره بلند محدود است. لازم به ذکر است که تزریق هیدروکربن‌ها در فرم‌های کوره بلند نیاز به تزریق اکسیژن به هوای دمشی به منظور رسیدن به دمای مناسب در کوره بلند را افزایش می‌دهد. [۷]

• تزریق پودر زغال سنگ (PCI^۱)

یکی از منابع هیدروکربنی که برای تزریق در کوره بلند و کاهش مصرف کک استفاده می‌شود پودر زغال است. تزریق پودر زغال که به PCI موسوم است، کاهش مصرف کک و صرفه جویی مقادیر قابل توجهی انرژی در کک سازی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش هزینه‌های نگهداری را به دنبال دارد. با این وجود، این تکنولوژی نیازمند انرژی

^۱ Pulverized Coal Injection

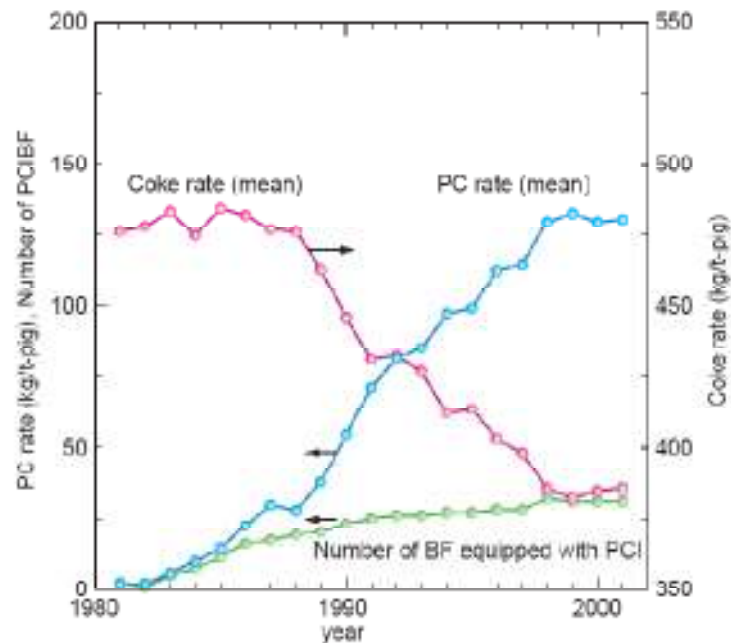
برای تزریق اکسیژن و زغال و همچنین تجهیزات سایش زغال می باشد. شکل ۲-۲ شماتیک تزریق پودر زغال به کوره بلند را نشان می دهد.



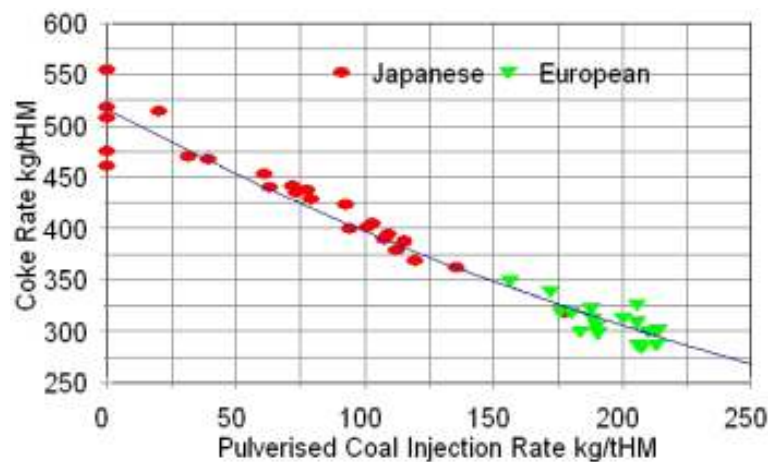
شکل ۲-۲. شماتیک تزریق پودر زغال به فرم های کوره بلند [۸]

تزریق یک تن زغال سنگ، به طور تقریبی باعث کاهش مصرف ۰/۸۵-۰/۹۵ تن کک می شود. هر چند که بیشترین میزان تزریق مجاز زغال در فرم ها ۰/۲۷ تن به ازای یک تن چدن مذاب می باشد. این میزان با توجه به ظرفیت تحمل بار کک و وضعیت ترموشیمیایی کوره بلند تعیین می شود. در سال ۲۰۰۶ تزریق پودر زغال در کوره بلندی در کشور هلند با نرخ ۰/۲۶-۰/۲۱ تن به ازای یک تن چدن مذاب انجام شده است.

شکل ۲-۳ روند تزریق زغال و کاهش مصرف کک را در کوره بلندهای ژاپن نشان می دهد. فواید استفاده از پودر زغال، کاهش مصرف کک، عدم نیاز به کک سازی و استفاده از زغال غیر کک شو است. شکل ۲-۴ نیز تاثیر نرخ افزودن پودر زغال را بر میزان مصرف کک در کوره بلندهای ژاپن و اروپا نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش نرخ تزریق زغال، مصرف کک کاهش یافته است.



شکل ۲-۳. روند تزریق زغال و کاهش مصرف کک در کوره بلندهای ژاپن [۹]

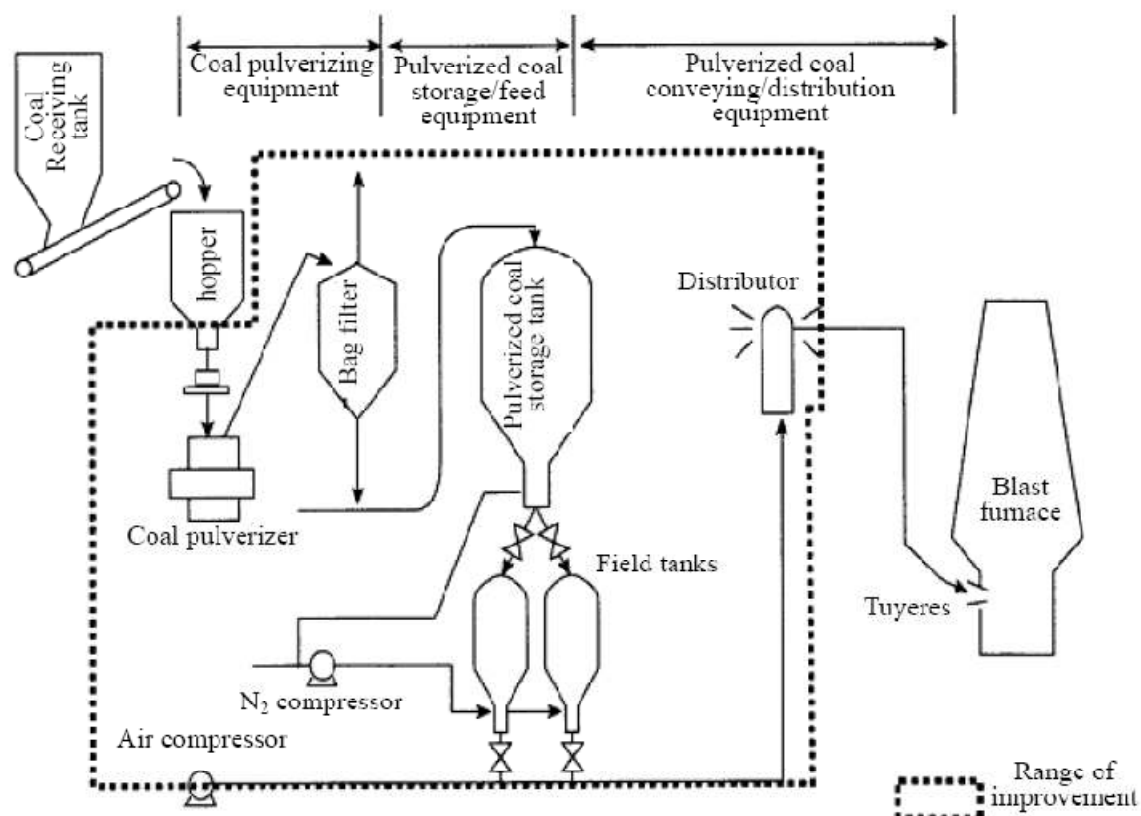


شکل ۲-۴. تاثیر افزودن پودر زغال بر مصرف کک

تکنولوژی تزریق پودر زغال به کوره بلند شامل تجهیزات دریافت زغال، تجهیزات خشک کننده و پودر کننده زغال، تجهیزات تزریق پودر و سیستم ابزار دقیق می باشد. زغال مورد استفاده که معمولاً از نوع غیر کک شو می باشد در اندازه های تقریبی ۷۴ میکرومتر پودر می شود. هر چند نوع زغال مورد استفاده و میزان پودر شدن آن به تجهیزات مورد استفاده بستگی دارد. تانک تزریق به وسیله یک کمپرسور تحت فشار قرار می گیرد و سپس به وسیله تجهیزات مربوطه به فرم های کوره بلند تزریق می شود.

با بهبود تکنولوژی کوره بلند و PCI، تزریق زغال با نرخ حداکثری ۲۰۰ کیلوگرم به ازای تولید یک تن چدن امکانپذیر شده است. [۱۰]

در شکل ۲-۵ تجهیزات مورد استفاده در تکنولوژی PCI نشان داده شده است.



شکل ۲-۵. تجهیزات مورد استفاده در تکنولوژی PCI [۸]

• تزریق گاز طبیعی

تزریق گاز طبیعی در فرم‌های کوره بلند نیز سبب کاهش مصرف کک می‌شود. این تکنولوژی نسبت به PCI هزینه سرمایه‌گذاری بالاتری نیاز دارد. علیرغم اینکه تزریق گاز طبیعی باعث کاهش مصرف کک در کوره می‌شود، ولی قیمت بالاتر آن نسبت به زغال، استفاده از گاز را در نرخ‌های پایین محدود می‌کند. نرخ جایگزینی کک با گاز طبیعی بین ۰/۹ تا ۱/۱۵ تن کک است.

عامل احیا در کوره بلند در شرایطی که از کک استفاده می‌شود و یا تزریق پودر زغال در کوره وجود دارد، مونوکسیدکربن است. در صورت تزریق گاز طبیعی، عنصر هیدروژن موجود در آن به عنوان عامل احیای سنگ آهن وارد واکنش شده و در نتیجه باعث کاهش آلودگی ناشی از تولید دی اکسید کربن می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که

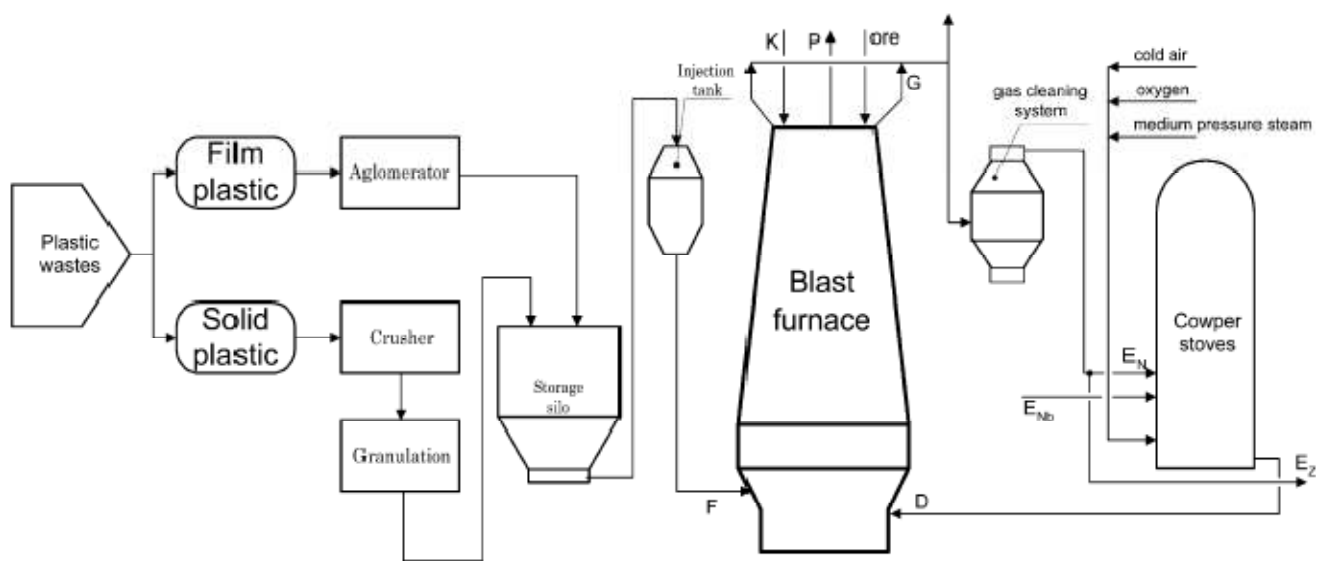
تزریق گاز طبیعی در کوره بلند سبب افزایش نرخ تولید، کاهش نرخ مصرف کک و بهبود عملکرد کوره بلند می شود. لازم به ذکر است که گاز طبیعی و پودر زغال به طور همزمان می توانند در کوره بلند تزریق شوند. این تکنولوژی در کارخانه های فولاد آمریکای شمالی مورد استفاده قرار گرفته است.

• تزریق نفت سنگین

در کوره بلند امکان تزریق نفت، با نرخ جایگزینی $1/2$ تن کک با ۱ تن نفت نیز وجود دارد. چنانچه از تکنولوژی Oxy-fule نیز استفاده شود، نرخ تزریق نفت به $0/13$ تن به ازای تولید یک تن چدن مذاب می رسد. نفت نیز به دلیل دارا بودن عنصر هیدروژن، مشکل تولید آلودگی ناشی از دی اکسید کربن در واکنش احیا را ندارد.

• تزریق ضایعات پلاستیک

تزریق ضایعات پلاستیک در کوره بلند نیز می تواند باعث کاهش مصرف کک شود. ارزش حرارتی پلاستیک نسبت به زغال بیشتر است. علاوه بر آن، تزریق پلاستیک همانند تزریق گاز طبیعی باعث افزایش میزان هیدروژن در کوره بلند می شود. از دیگر مزایای تزریق پلاستیک کاهش مقادیر سولفور و آلکالی می باشد. وجود کلرین در پلاستیک سبب تشکیل دی اکسین خواهد شد که این امر وجود تجهیزات کنترلی پیشرفته تری برای دود خروجی را سبب خواهد شد. ماکزیمم مقدار تئوری تزریق پلاستیک در کوره بلند، $0/07$ تن به ازای تولید یک تن چدن مذاب می باشد که مقدار آن با توجه به شرایط ترموشیمیایی و سینتیک کوره تعیین خواهد شد. در سال ۲۰۰۴، تزریق پلاستیک در کوره بلند یکی از کارخانه های فولاد آلمان با نرخ $0/067$ تن به ازای یک تن چدن مذاب اجرا شده است. ۱٪ از پلاستیک بازیافت شده در ژاپن در صنعت فولاد مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل ۲-۶ شماتیک فرایند تزریق پلاستیک به کوره بلند نشان داده شده است.



شکل ۲-۶. شماتیک تزریق پلاستیک به فرم های کوره بلند [۵]

• تزریق گاز کک و گاز فولادسازی (CO^1 و BOF^2)

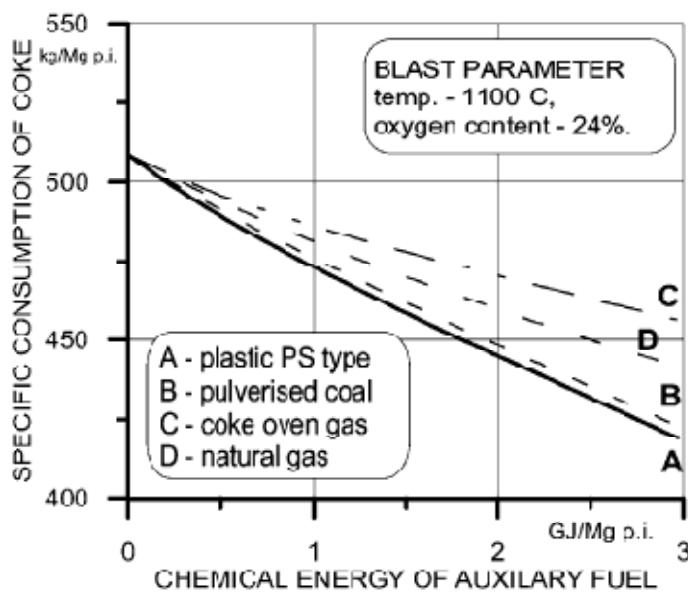
از گاز کک و گاز فولادسازی نیز می توان در کوره بلند بهره برد هر چند به لحاظ انرژی حرارتی، تزریق پودر زغال در کوره راندمان بیشتری را نسبت به این دو گاز سبب خواهد شد. ماکزیمم مقدار تئوری برای تزریق گاز کک در فرم های کوره بلند ۰/۱ تن به ازای تولید یک تن چدن مذاب می باشد. گاز کک را می توان با نرخ جایگزینی ۰/۹۸ تن کک با ۱ تن گاز کک استفاده نمود و مقدار آن با توجه به شرایط ترموشیمیایی و سینتیک کوره محدود می شود. لازم به ذکر است که جهت تزریق گاز کک در کوره بلند نیاز به نصب کمپرسور است که این امر مستلزم صرف انرژی الکتریکی معادل با ۱۸۵ کیلووات ساعت به ازای تزریق یک تن گاز کک می باشد.

در شکل های زیر تأثیر تزریق سوخت های مختلف (ضایعات پلاستیک، زغال سنگ پودر شده، گاز طبیعی و گاز کک)

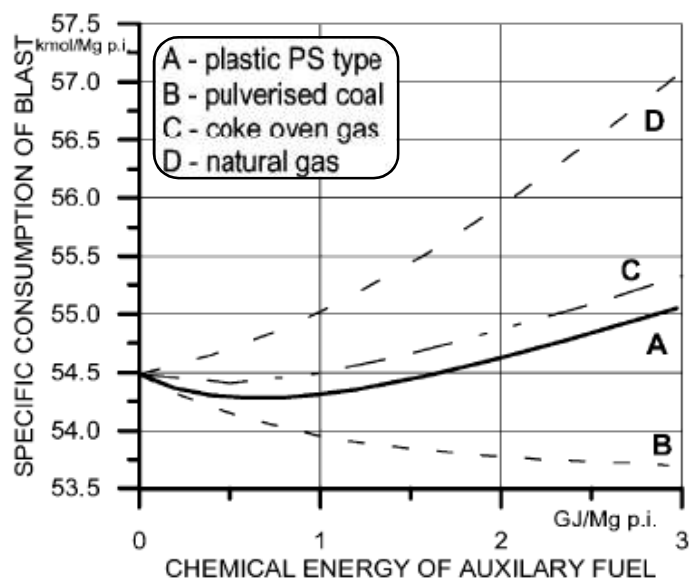
به کوره بلند، بر روی پارامترهای مختلف نشان داده است. [۵]

¹ Coke Oven Gas

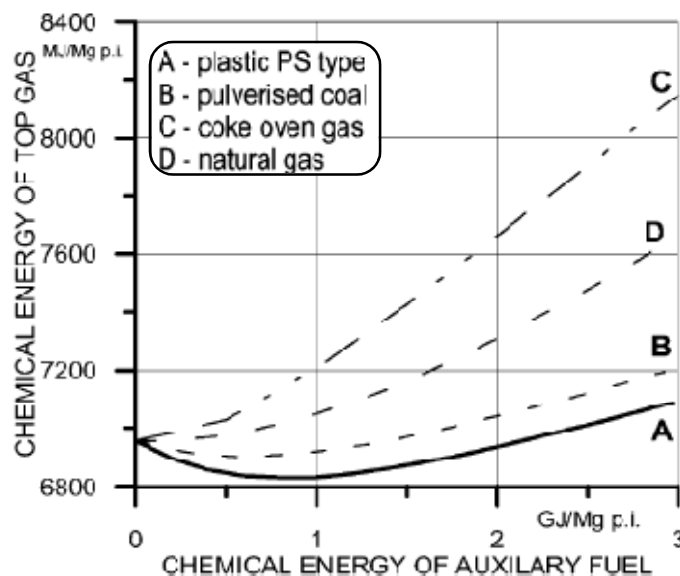
² Basic Oxygen Furnace Gas



شکل ۷-۲. تاثیر تزریق سوختهای مختلف بر مصرف ویژه کک



شکل ۸-۲. تاثیر تزریق سوختهای مختلف بر مصرف ویژه هوای دمشی



شکل ۲-۹. تاثیر تزریق سوختهای مختلف بر انرژی شیمیایی گاز کوره بلند

افزایش میزان تزریق سوختهای مختلف باعث کاهش مصرف کک، افزایش مصرف هوای دمشی و افزایش انرژی شیمیایی گاز کوره بلند می شود. لازم به ذکر است که افزایش تزریق پودر زغال باعث کاهش مصرف هوای دمشی می شود. لذا با توجه به این موضوع، دسترسی بیشتر و قیمت پایین تر، تزریق زغال سنگ پودر شده به کوره بلند متداول تر از سایر سوختهای اشاره شده است.

۲-۲. تزریق گازهای داغ احیا کننده به کوره بلند

علیرغم تاثیر مثبت تزریق سوختهای فسیلی به کوره بر روی مصرف کک و همچنین راندمان تولید، مصرف آنها به دلایلی محدود می شود. از جمله دلایل محدودیت می توان به افت دمای شعله در ناحیه احتراق کوره بلند، احتراق ناقص سوخت و تشکیل زغال نیم سوخته در کوره بلند و در نتیجه کاهش نفوذپذیری گاز در کوره، آلوده شدن ناحیه غیرفعال^۱ و نهایتا کاهش راندمان تولید اشاره نمود. یکی دیگر از روشهای کاهش مصرف کک تزریق گازهای داغ احیا کننده (HRG^۲) می باشد. این گازها با استفاده از گازسازی سوخت های فسیلی و یا بازیابی گاز کوره بلند تولید می شود. استفاده از HRG همراه با PCI و غنی سازی هوای دمشی با اکسیژن، امکان افزایش نرخ تزریق پودر زغال تا ۳۰۰-۴۰۰ کیلوگرم به ازای تولید یک تن چدن مذاب و افزایش بهره وری کوره بلند تا ۴۰-۵۰٪ را فراهم می نماید.

تحقیقات تئوری بسیار زیادی در مورد تزریق HRG به کوره بلند انجام شده و همچنین از سال ۱۹۶۰ نمونه های به

^۱ Deadman

^۲ Hot Reducing Gas

شکل آزمایشی اجرا شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از این تکنولوژی فوایدی دارد ولی به دلیل پیچیدگی آن کارهای بیشتری انجام نشده است. علاوه بر این تزریق سوخت فسیلی نسبت به HRG به صرفه تر و از لحاظ تکنولوژیکی ساده تر است.

با توجه به محدودیت منابع سوخت های فسیلی، استفاده از HRG در سالهای اخیر مجدداً مورد توجه قرار گرفته است. ولی علیرغم تحقیقات بسیار و نتایج تئوریتیک خوبی که در مورد استفاده از این نوع گازها بدست آمده همچنان تزریق این نوع گاز به لحاظ تئوری و عملی مورد بحث متخصصین کوره بلند است. در این بخش ابتدا به مشکلات ناشی از تزریق سوخت های فسیلی به کوره بلند به طور مختصر اشاره شده و سپس نتایج تزریق HRG به کوره بلند که بر اساس یک مدلسازی بدست آمده اند، ارائه شده است. [۴]

۲-۲-۱. تاثیر تزریق سوخت فسیلی به کوره بلند بر روی عملکرد آن

✓ کاهش دمای شعله

تزریق سوخت به فرم های کوره بلند باعث کاهش دمای شعله خواهد شد. دلیل این امر افزایش حجم گاز در شکم کوره نسبت به حرارت آزاد شده از سوخت است. گرمای احتراق سوخت های کمکی در مقایسه با گرمای سوختن کک به دلیل فرآیند پیرولیز و همچنین احتراق ناقص کمتر است. تبدیل ناقص سوخت به تولید زغال نیم سوخته منجر شده و سبب کاهش نفوذپذیری گاز، آلودگی ناحیه غیرفعال و در نهایت کاهش راندمان کوره بلند خواهد شد. در سوخت های فسیلی با افزایش نسبت کربن به هیدروژن میزان افت دمای شعله افزایش می یابد. در جدول ۱-۲ میزان کاهش دمای شعله در اثر تزریق سوخت فسیلی به کوره بلند نشان داده شده است.

جدول ۱-۲. میزان کاهش دمای شعله در اثر تزریق سوخت های مختلف به کوره بلند

سوخت	نرخ تزریق	میزان کاهش دمای شعله (°C)
گاز طبیعی	100 m ³ /THM	350-450
نفت سنگین	100 kg/THM	300-350
گاز کک	100 m ³ /THM	200-250
خاکستر زغال	100 kg/THM	80-120

در تزریق گازهای احیا کننده به کوره، به دلیل پیرولیز ناچیز و همچنین دمای بالای گاز، دمای شعله کمتر کاهش می یابد و مشکل احتراق ناقص نیز به وجود نخواهد آمد.

برای ثابت ماندن دمای شعله در زمان تزریق سوخت فسیلی، تمهیداتی همچون غنی کردن هوای دمشی با استفاده از میزان بیشتری از اکسیژن، افزایش دما و کاهش میزان رطوبت هوای دمشی در نظر گرفته می شود. هر چند که با تغییر تکنولوژی با ثابت ماندن دمای شعله ممکن است دما و ساختار لازم برای چدن مذاب تامین نشود.

✓ نفوذپذیری گاز و تخلیه چدن مذاب

هر چه نرخ کک در کوره بلند کمتر باشد، میزان نفوذپذیری گاز در بخشهای پایینی کوره و منطقه چسبنده^۱ و همچنین تخلیه چدن مذاب مشکل تر خواهد بود. کیفیت بالای کک برای محدود کردن میزان تجمع آلودگی در کوره بخصوص در ناحیه غیر فعال و برای تامین شرایط دینامیکی مناسب برای گاز لازم است. تزریق HRG باعث بهبود وضعیت در بوته می شود به این دلیل که این گاز باعث تولید دوده، زغال نیم سوخته و یا خاکستر نمی شود. علاوه بر این استفاده از HRG نسبت به تزریق پودر زغال، نفت و یا پلاستیک تاثیر منفی کمتری بر خصوصیات فیزیکی، ساختار و مقدار سرباره دارد.

✓ محدودیت های استفاده از سوخت های فسیلی و فواید استفاده از HRG

- گازهای داغ احیا در مقایسه با سوخت های فسیلی دارای مزایای زیر می باشند:
- نسبت به سوخت های فسیلی دارای مقادیر بیشتری مونوکسیدکربن و هیدروژن می باشند.
- به دلیل عامل احیای بیشتر در HRG، میزان تولید کوره بلند افزایش می یابد.
- عمل اختلاط جریان گاز با هوای دمشی بهبود می یابد در نتیجه نرخ استفاده از عوامل احیا افزایش می یابد.
- قسمت های پایینی کوره تمیزتر باقی می ماند.

۲-۲-۲. نتایج تزریق HRG به کوره بلند

برای بررسی نتایج حاصل از تزریق HRG به کوره بلند از یک مدل ریاضی که بر اساس موازنه جرم و انرژی تهیه شده استفاده شده است. این مدل برای یک کوره واقعی با مشخصات زیر انجام و نتایج به دست آمده با هم مقایسه شدند. مشخصات این کوره در جدول ۲-۲ ارائه شده است.

جدول ۲-۲. مشخصات کوره بلند مورد نظر برای شبیه سازی بر اساس تزریق HRG

3800	حجم کوره (m ³)
40	تعداد فرم
1160-1180	دمای هوای دمشی (°C)
160	نرخ تزریق پودر زغال (kg/THM)

^۱ cohesive

24.1%	درصد حجمی اکسیژن هوای دمشی
0.37% Si & 0.029% S	مشخصات چدن مذاب

با استفاده از مدل مذکور کوره در چهار حالت مدلسازی و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. در حالت اول و دوم، HRG از گازسازی زغال بدست آمده است. در حالت سوم با تبدیل بخار از گاز طبیعی (steam conversion of N.G) و در حالت چهارم گاز کوره بعد از خارج کردن گاز CO_2 می‌باشد.

در جدول ۲-۳ تاثیر استفاده از این گازها بر عملکرد کوره بلند در چهار حالت مذکور نشان داده شده است.

جدول ۲-۳. تاثیر تزریق HRG بر روی عملکرد کوره بلند بر اساس نتایج شبیه سازی

	Base	1	2	3	4
Blast:					
temperature, °C	1180	1180	1180	1180	1180
oxygen, %	24,1	34,3	31,0	31,7	30,5
PC, kg/tHM	180	180	180	180	180
HRG, m3/tHM	0	150	150	150	150
composition in %:					
H2		33,1	44,0	71,0	25,0
CH4		0,0	1,0	3,0	0,0
CO		52,9	51,5	22,8	72,0
N2		0,0	0,0	1,0	0,0
CO2		7,0	3,0	3,0	1,5
H2O		6,5	0,5	0,0	1,5
temperature, °C		700	1000	1000	1000
direct reduction rate, %	52,9	44,7	44,0	40,8	46,3
Coke, kg/tHM	345	345	310	298	318
total fuel, kg/tHM	511	511	477	464	494
blast vol., m3/tHM	1000	724	740	718	756
Top gas, %					
composition in %					
CO2	20,8	24,0	24,0	24,2	23,8
CO	28,1	34,8	31,3	28,0	32,8
H2	3,5	6,5	6,7	8,6	5,5
N2	48,5	34,7	37,9	38,2	37,9
calorific power, kJ/m3	3885	5107	4885	4585	4733
temperature, °C	186	107	125	126	125
CO utilization rate	43,7	40,2	42,8	44,8	41,5
H2 utilization rate	48,1	42,3	45,1	47,3	43,8
Heat balance, kJ/kgHM					
combust. of C of coke	1420,0	1584,1	1301,0	1255,3	1319,3
combust. of PC	1092,1	1092,1	1092,1	1092,1	1092,1
combust. of HRG	0,0	-271,2	-84,1	-49,7	-57,2
heat carried by PC	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
heat carried by HRG	0,0	149,6	217,0	222,1	213,3
heat carried by the blast	1554,3	1124,2	1149,3	1114,4	1174,8
oxidizing C -- CO	1096,3	934,4	920,1	855,6	964,9
oxidizing CO -- CO2	3989,9	4106,8	4035,8	3877,2	4120,0
oxidizing H2 --H2O	500,9	717,0	807,1	1075,2	643,0
total in reduction area	5587,0	5758,2	5763,0	5808,0	5727,9
total heat generated	9845,0	9448,5	9469,9	9453,8	9481,9
useful heat absorbed	8868,8	8868,9	8852,5	8846,5	8856,0
heat in top gases	370,4	214,3	249,7	244,9	253,6
external heat losses	407,8	369,0	370,7	364,6	375,4
total heat absorbed	9647,0	9452,3	9472,9	9456,0	9485,0
flame temperature, °C	2150	2150	2150	2150	2150
Productivity, %	100,0	111,3	110,9	114,8	108,4

نتایج بدست آمده از این مدلسازی در این بخش تشریح شده است.

(۱) در حالت اول HRG حاوی مقدار زیادی عامل اکسایش ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 13.5\%$) با دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد است. گرمای محسوس این گاز به دلیل دمای پایین آن کم است و به دلیل حرارت مورد نیاز برای شکستن CO_2 و H_2O ، در این حالت علیرغم کاهش ۸ درصدی در نرخ احیای مستقیم و افزایش ۱۱ درصدی تولید، تغییری در مصرف کک صورت نمی پذیرد.

(۲) در حالت دوم عوامل اکسایش ۳/۵٪ کاهش یافته و دمای هوای دمشی تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یافته و سبب کاهش مصرف کک به میزان ۳۵ kg/THM و افزایش نرخ تولید به میزان ۱۱٪ می شود.

(۳) در حالت سوم HRG با ترکیب $\text{CO}_2 = 3\%$ ، $\text{CH}_4 = 3\%$ ، درصد بالای H_2 و دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به کوره تزریق خواهد شد. در این حالت مصرف کک به دلیل کاهش ۱۲ درصدی نرخ احیای مستقیم و نیاز کمتر به حرارت برای شکستن CO_2 و H_2O به میزان ۷۴ kg/THM کاهش و نرخ تولید به میزان ۱۵٪ افزایش می یابد.

(۴) در حالت چهارم گاز کوره بلند (بعد از خارج کردن CO_2) که حاوی مقدار زیادی CO و H_2 (۷۲٪ و ۲۵٪) و مقدار کمی عامل اکسایش ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 3\%$) می باشد به کوره تزریق خواهد شد. تزریق این گاز با دمای ۱۰۰۰ درجه به بوتۀ کوره نرخ مصرف کک را به میزان ۲۷ kg/THM کاهش و نرخ تولید را به میزان ۸٪ افزایش می دهد.

۳-۲-۲. مقایسه تزریق HRG و تزریق همزمان HRG و PC

در جدول ۲-۴ محاسبات مدل برای کوره بلند برای تزریق همزمان HRG و PC و تزریق صرفا HRG در کوره بلند ۲ برای حالت های مختلف ارائه شده است. در تمامی موارد HRG دارای مشخصات زیر است.
($\text{H}_2 = 33\%$ ، $\text{CO} = 60\%$ ، $\text{CH}_4 = 3\%$ ، $\text{CO}_2 = 4\%$ و دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد)

در موارد ۱ و ۲ تزریق پودر زغال و گاز احیا همزمان صورت می پذیرد، در حالت اول بخشی از پودر زغال و در حالت دوم تمام پودر زغال یا گاز احیا جایگزین می شود. با توجه به اینکه کوره های مدرن و تجهیزات آماده سازی پودر زغال، تزریق پودر را تا ۱۵۰ کیلوگرم به ازای یک تن چدن تضمین می کنند در نتیجه در موارد ۱ و ۲ تاثیر مثبت استفاده از HRG مشخص نمی شود. در این حالت مصرف کک افزایش می یابد.

در مورد ۳ تزریق همزمان و با مقدار استاندارد پودر زغال صورت می گیرد. (150 kg/THM و $150 \text{ m}^3/\text{THM}$). در این حالت نرخ احیا ۸٪ در مقایسه با حالت پایه کاهش می یابد. به همین دلیل نرخ مصرف کک ۳۵ kg/THM کاهش و تولید به میزان ۱۰٪ افزایش می یابد.

در موارد ۴ تا ۶ تزریق پودر با نرخ در محدوده $50-100 \text{ kg/THM}$ انجام می شود. در این موارد میزان تولید به دلیل افزایش میزان اکسیژن هوای دمشی، ۱۵ تا ۳۰٪ افزایش و میزان مصرف کک به میزان $83-150 \text{ kg/THM}$ کاهش می یابد.

چنانچه قبلاً اشاره شد با تغییر پارامترهای هوای دمشی، دمای مورد نیاز برای شعله نیز تغییر می کند و تنظیم دمای شعله برای رسیدن به دمای اولیه لازم نیست. موارد ۷ و ۸ با استفاده از این اصل محاسبه شده اند. در این موارد نرخ تزریق HRG تا $50 \text{ m}^3/\text{THM}$ افزایش می یابد. در مورد ۷، نرخ مصرف کک به میزان 14 kg/THM و در مورد ۸ به میزان 13 kg/THM کاهش می یابد. نرخ تولید سرباره در همه موارد ثابت است.

در جدول ۲-۴ تاثیر تزریق همزمان HRG و PC بر عملکرد کوره بلند بر اساس نتایج شبیه سازی نشان داده شده است.

جدول ۲-۴. تاثیر تزریق همزمان HRG و PC بر عملکرد کوره بلند بر اساس نتایج شبیه سازی

	Base	1	2	3	4	5	6	7	8
Blast:									
temperature, °C	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160
oxygen, %	24,1	24,1	26,5	31,2	36,7	44,1	75,0	31,2	75,0
volume, m3/tHM	1.012	997	820	748	644	545	315	725	304
HRG, m3/tHM	0	40	300	150	150	150	300	200	350
PC, kg/tHM	150	125	0	150	200	250	250	150	250
direct reduction rate, %	53,2	53,0	49,0	45,0	41,3	38,0	32,1	42,5	30,4
bosh gas flow, m3/tHM	1376	1387	1388	1254	1177	1108	1025	1277	1060
Coke, kg/tHM	359	375	447	325	276	229	208	311	195
total fuel, kg/tHM	514	504	443	481	485	491	471	467	458
slag vol., kg/tHM	278	277	270	273	272	272	269	270	267
Top gas, %									
composition in % CO ₂	20,7	20,5	21,1	23,9	26,1	28,3	32,1	23,9	31,4
CO	26,4	27,3	34,2	32,4	34,3	36,6	46,6	32,9	46,8
H ₂	3,4	3,6	5,5	6,1	7,4	8,9	13,4	6,9	14,3
N ₂	49,6	48,5	39,2	37,6	32,2	26,1	7,9	36,3	7,5
cal. power, kJ/m3	3705	3846	4920	4756	5136	5592	7344	4902	7459
temperature, °C	165	165	149	123	100	80	68	126	69
CO utilization rate in %	43,3	42,2	37,6	41,9	42,6	43,1	40,2	41,6	39,7
H ₂ utilization rate in %	45,6	44,5	39,6	44,2	44,9	45,4	42,4	43,8	41,8
Heat balance, kJ/kgHM									
combustion of C of coke	1533,4	1681,2	237,7	1408,8	1059,0	720,5	661,0	1335,0	580,7
combustion of PC	1023,9	855,6	0,0	1023,9	1365,2	1706,5	1706,5	1023,9	1706,5
combustion of HRG	0,0	-18,3	-137,4	-68,7	-68,7	-68,7	-137,4	-91,6	-160,3
heat carried by PC	10,8	9,0	0,0	10,8	14,4	18,0	18,0	10,8	18,0
heat carried by HRG	0,0	59,2	444,1	222,1	222,1	222,1	444,1	296,1	518,2
heat carried by the blast	1521,3	1499,7	1233,6	1124,9	967,7	819,3	473,0	1090,7	457,4
oxidizing C - CO	1102,8	1099,6	1019,5	939,2	866,6	799,9	683,0	890,5	648,2
oxidizing CO - CO ₂	3973,3	3973,0	4032,2	4089,0	4128,7	4156,9	4222,7	4109,2	4223,9
oxidizing H ₂ - H ₂ O	484,5	491,4	605,7	722,3	837,8	951,0	1135,3	805,3	1205,9
total heat generated	9650,0	9650,4	9575,0	9472,3	9392,8	9325,4	9206,3	9469,8	9198,4
useful heat absorbed	8871,3	8869,2	8851,7	8855,4	8852,7	8850,8	8841,1	884,9	8834,8
heat in top gases	371,9	375,4	338,1	247,9	186,7	134,8	50,4	258,6	53,7
external heat losses	408,9	408,6	391,8	372,2	356,0	341,8	316,5	366,5	312,0
total heat absorbed	9652,1	9653,2	9581,5	9475,5	9395,3	9327,4	9208,0	9473,7	9200,6
flame temperature, °C	2150	2150	2150	2150	2150	2150	2150	2079	2048
Productivity, %	100,0	100,3	105,7	110,1	114,9	119,5	130,2	109,8	128,5

۲-۳. شارژ آگلومره کامپوزیت کربنی (CCB^۱)

ساختار، شکل، مقدار کربن و خصوصیات فیزیکی آگلومره‌ها بر اساس نوع مواد اولیه و فرآیند تشکیل، بسیار متفاوت می‌باشد. در سالهای اخیر استفاده از آگلومره کامپوزیت کربنی به دلایل مختلفی همچون صرفه‌جویی در انرژی، بازیابی منابع و مسائل زیست محیطی به عنوان ماده اولیه مورد استفاده در کوره بلند بسیار مورد توجه بوده است. آگلومره

^۱ Carbon Composite Agglomerate

کامپوزیت کربنی، مخلوطی از کانی‌های آهن ریزدانه (هماتیت، مگنتیت، غبار حاوی آهن، کانی‌های ریز حاوی آهن احیا شده) و مواد کربن‌دار ریز (کک ریز، زغال ریز، زغال چوب) است. نتایج تست این نوع آگلومره در کوره بلند حاکی از آن است که با شارژ این آگلومره در کوره بلند دارای مزایای متعددی است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- (۱) مصرف کمتر کک و در نتیجه کاهش مصرف انرژی
- (۲) استفاده موثر از زغال غیر کک شو و ضایعات آهن در بخش ریخته‌گری کارخانه فولاد و در نتیجه کاهش نیاز به مواد خام و بهبود گردش و بازیابی مواد
- (۳) انجام واکنش‌های احیا در دمای پایین‌تر و با سرعت بیشتر [۱۱]

در نتیجه استفاده از این نوع آگلومره باعث بهبود عملکرد کوره و کاهش مصرف انرژی خواهد شد. تحقیقات متعددی بر روی تاثیر استفاده از این نوع آگلومره بر روی عملکرد کوره بلند انجام شده است. در این بخش نتایج شبیه‌سازی یک کوره بلند با شارژ آگلومره کامپوزیت کربنی ارائه می‌شود. [۱۱] برخی از پارامترهای عملکرد کوره بلند مورد نظر در جدول ۲-۵ آمده است.

جدول ۲-۵. مشخصات کوره بلند مورد نظر برای شبیه سازی شده بر اساس استفاده از CCB

مشخصات	کوره
حجم کوره (m^3)	2303
ظرفیت تولید (ton/day)	5000
دمای هوای دمشی ($^{\circ}C$)	1050
نرخ هوای دمشی (Nm^3/min)	4119
درصد حجمی اکسیژن هوای دمشی	24 %
نرخ تزریق پودر زغال (kg/s)	8

از جمله مواد آهن دار شارژ شده به کوره بلند مورد نظر، زینتر می‌باشد که در شبیه‌سازی‌های انجام شده بخشی از زینتر با آگلومره کامپوزیت کربنی جایگزین می‌شود. مشخصات فیزیکی و ترکیب درصد زینتر و CCB مورد استفاده، در جداول زیر ارائه شده است.

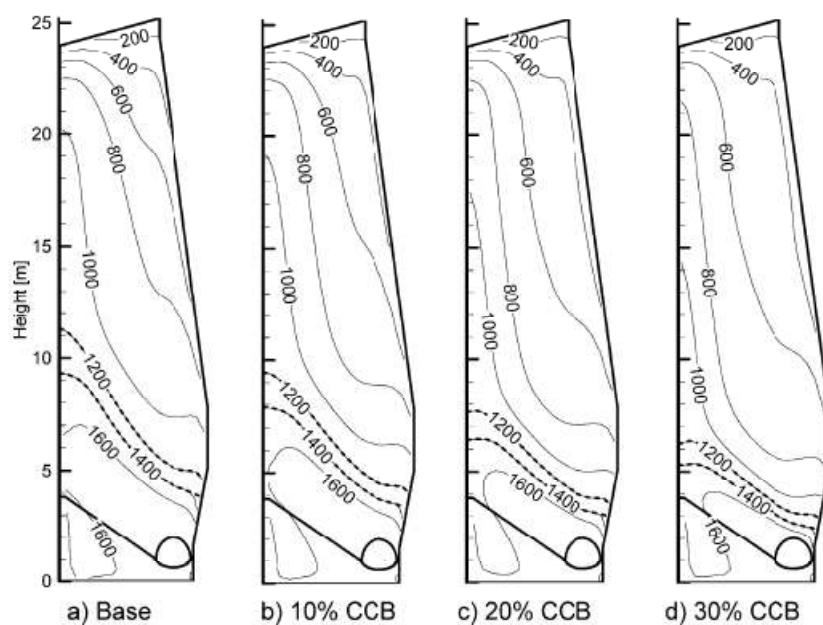
جدول ۲-۶. ساختار CCB و زینتر (درصد جرمی)

	Fe_2O_3	Fe_3O_4	FeO	Fe	H_2O	C	C/O (نسبت مولی)
CCB	75	0	0	0	0	20	0.84
sinter	78.55	6.15	0	0	0.19	0	-

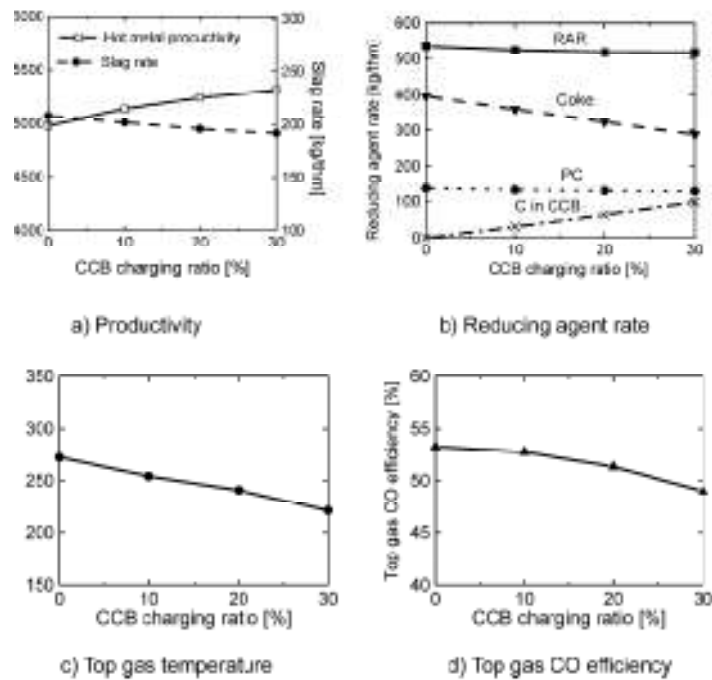
جدول ۲-۷. مشخصات فیزیکی CCB و زینتر

CCB	Sinter	
52.7	59.4	T _{Fe} (%)
25	25	دمای ورودی (°C)
4200	3500	دانسیتته (kg/m ³)
0.95	0.84	ضریب شکل
16-30	15	قطر (mm)

تاثیر استفاده از این نوع آگلومره بر روی دمای نواحی مختلف کوره، میزان تولید، نرخ احیا، دمای گاز دهانه و راندمان کوره در شکل‌های زیر نشان داده شده است. درصد CCB در این اشکال، نرخ جایگزینی زینتر با CCB می‌باشد.



شکل ۲-۱۰. تاثیر استفاده از CCB بر روی سطوح دمایی داخل کوره بلند



شکل ۲-۱۱. تاثیر استفاده از CCB بر روی مشخصه های کاری کوره بلند

بالانس انرژی کوره بلند در مقادیر مختلف شارژ CCB در جدول ۲-۸ ارائه شده است.

جدول ۲-۸. بالانس انرژی کوره بلند در مقادیر مختلف شارژ CCB (GJ/THM)

Item		Base	10%CCB	20%CCB	30%CCB
In	Blast	1.74	1.69	1.65	1.63
	Raceway combustion	3.23	3.13	3.06	3.02
	Others	0.21	0.21	0.20	0.20
	Total	5.18	5.03	4.91	4.85
Out	Top gas	0.62	0.56	0.52	0.47
	Hot metal	0.97	0.97	0.98	0.98
	Hot slag	0.42	0.41	0.39	0.38
	Heat loss through wall	0.23	0.20	0.18	0.16
	Reduction and melting of CCB	0.00	0.31	0.64	0.99
	Reduction and melting of sinter	0.72	0.66	0.59	0.52
	Direct reduction	0.07	0.09	0.11	0.12
	Solution loss	Raceway	0.14	0.14	0.13
		Belly	0.88	0.78	0.56
	Silicon transfer reactions	0.92	0.80	0.67	0.52
	Others	0.19	0.09	0.04	0.01
	Total	5.16	5.01	4.92	4.84

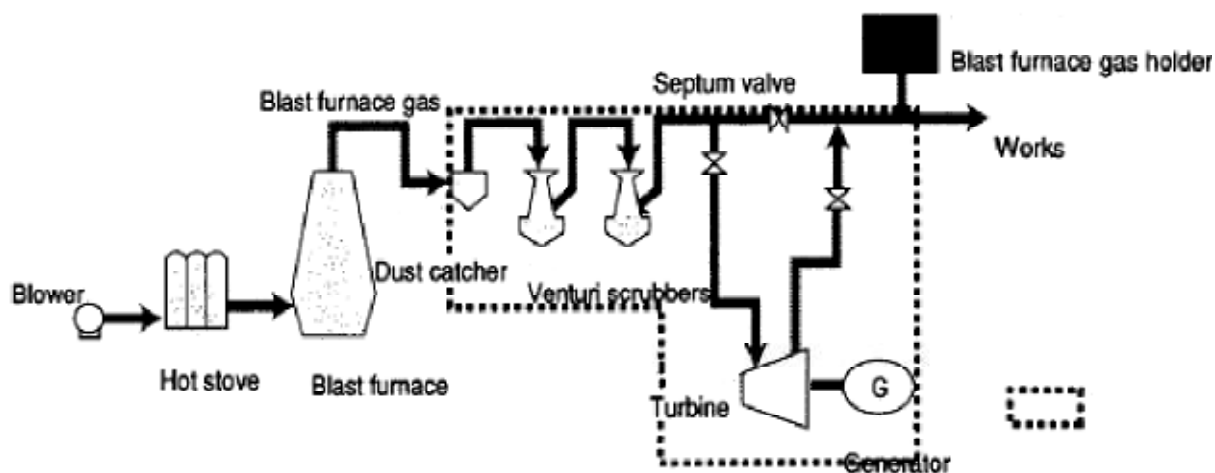
نتایج شبیه سازی نشان می دهند در صورت شارژ CCB به کوره بلند، سطوح دمایی در داخل کوره به سمت پایین شیفته شده می شوند. همچنین شارژ CCB به کوره بلند سبب افزایش نرخ تولید و کاهش مصرف کک به میزان قابل توجهی خواهد شد. با شارژ آگلومره کامپوزیت کربنی با نرخ ۳۰٪، نرخ تولید ۶/۷٪ افزایش و نرخ مصرف کک ۲۶/۸٪ کاهش می یابد.

۴-۲. توربین های انبساطی (TRT)^۱

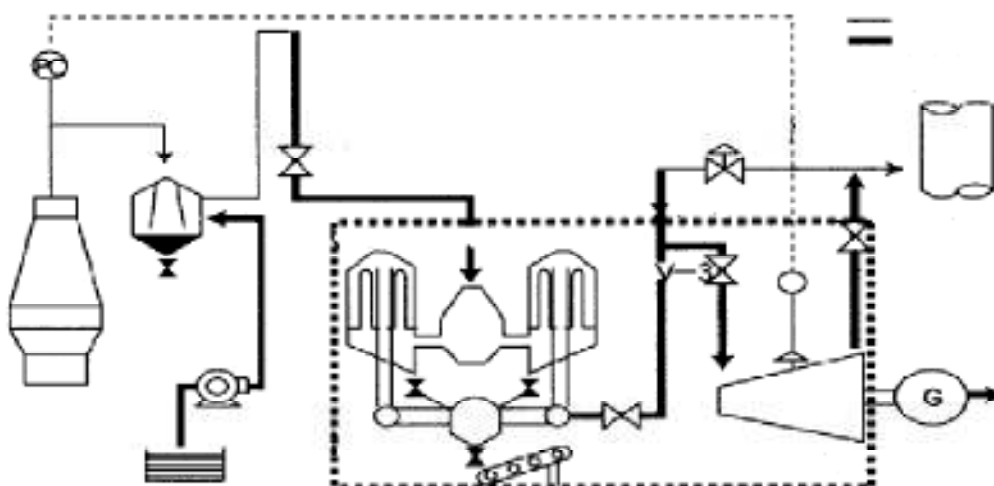
فشار گاز کوره (۲/۵-۰/۲۵ بارگیج) به ویژه در کوره بلندهای مدرن و همچنین حجم نسبتاً زیاد این گاز، امکان استفاده از آن را در توربین های انبساطی برای تولید برق فراهم می سازد. تولید برق با استفاده از این روش زمانی توجیه اقتصادی دارد که فشار گاز بالاتر از ۱/۵ بار گیج باشد. گاز کوره بعد از خروج از توربین نیز می تواند به عنوان سوخت در بخش های مختلف کارخانه مورد استفاده قرار گیرد. در کشور ژاپن همه کوره بلندها به TRT مجهز می باشند. تولید برق با استفاده از گاز کوره بسته به نوع تصفیه گاز به دو روش خشک و مرطوب انجام می شود. در روش مرطوب تصفیه گاز با استفاده از اسکرابر و در روش خشک با استفاده از غبارگیر خشک انجام می پذیرد. در روش خشک افت دمای گاز نسبت به روش مرطوب ناچیز بوده، در نتیجه برق تولیدی در بهترین حالت ممکن ۱/۶ برابر برق تولیدی به روش مرطوب می باشد. [۷]

برای یک کوره با ظرفیت تولید ۱/۱ میلیون تن چدن مذاب در سال (۳۳۰۰ تن در روز)، دبی گاز تولیدی ۲۱۲،۵۰۰ نرمال متر مکعب بر ساعت خواهد بود که با استفاده از TRT به روش خشک امکان تولید ۷ مگاوات برق وجود خواهد داشت. لازم به ذکر است که تولید برق با استفاده از TRT، تنها در کوره هایی با ظرفیت تولید بیشتر از یک میلیون تن در سال توجیه اقتصادی دارد. [۱۰] در شکل های زیر نحوه استفاده از این سیستم به دو روش مرطوب و خشک نشان داده شده است.

¹ Top-Pressure Recovery Turbines



شکل ۲-۱۲. تولید برق با استفاده از TRT به روش مرطوب [۱۰]



شکل ۲-۱۳. تولید برق با استفاده از TRT به روش خشک [۱۰]

۲-۵. بازیافت گاز کوره بلند

به طور معمول تولید گاز کوره بلند ۲۲۱۰-۱۳۲۰ نرمال مترمکعب به ازای تولید یک تن چدن مذاب می باشد. گاز کوره حاوی ۲۸-۲۰٪ مونوکسید کربن (CO) و ۵-۱٪ هیدروژن (H_2) است. در نتیجه این گاز حاوی ارزش حرارتی است و می توان آن را به عنوان منبع انرژی بازیافت نمود. ارزش حرارتی گاز کوره بسته به میزان گاز CO، بین ۲/۷ تا ۴ مگاژول بر نرمال مترمکعب متغیر می باشد. با توجه به اینکه ارزش حرارتی گاز کوره نسبتاً پایین است غالباً با گاز طبیعی و یا گاز کک مخلوط شده و سپس به عنوان سوخت مورد استفاده قرار می گیرد.

گاز کوره می‌تواند به عنوان سوخت در واحدهای تولیدی کارخانه (آگلومراسیون، نورد و ...) استفاده و یا برای تولید برق در توربین بخار و توربین گاز به کار گرفته شود.

برای مهار کردن گاز کوره، دهانه کوره بلند به صورت بسته می‌باشد. در کوره بلندهایی که دهانه آن‌ها دارای سیستم دوزنگی است چنانچه فشار ناحیه بین دو زنگ کنترل نشود، در هر بارگیری به میزان زیادی تلفات گاز کوره به محیط وجود خواهد داشت. برای جلوگیری از این امر فضای بین دو زنگ با گاز کوره پر شده و در نتیجه این منطقه با کوره هم فشار می‌شود. به این ترتیب می‌توان از اتلاف مقادیر زیادی از انرژی جلوگیری نمود. [۷]

۲-۵-۱. بازیافت گاز کوره بلند به عنوان سوخت در واحدهای تولیدی کارخانه (کوره بلند، آگلومراسیون،

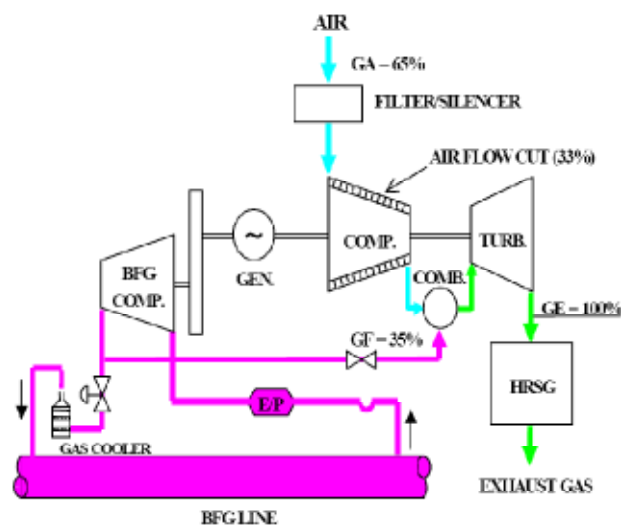
نورد،...)

چنانچه اشاره شد گاز کوره بلند به دلیل CO موجود در آن دارای ارزش حرارتی است که بسته به میزان گاز CO، بین ۲/۷ تا ۴ مگاژول بر نرمال مترمکعب متغیر می‌باشد. در نتیجه می‌تواند به عنوان سوخت در واحدهای تولیدی کارخانه مورد استفاده قرار گیرد. از جمله موارد کاربرد این گاز در واحد کوره بلند، استفاده از آن به عنوان سوخت مصرفی در کائوپرها برای افزایش دمای هوای دمش تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. همچنین این گاز می‌تواند با گاز طبیعی با نسبت معین مخلوط شده و در سایر واحدهای تولیدی از جمله آگلومراسیون و نورد به عنوان سوخت کوره مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که به توجه به دمای نسبتاً پایین گاز کوره در خروج از دهانه (۱۸۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد) امکان بازیافت حرارت محسوس آن وجود ندارد.

۲-۵-۲. بازیافت گاز کوره بلند برای تولید برق در نیروگاه بخار و نیروگاه گازی

در سالهای گذشته گاز طبیعی به عنوان بهترین و مناسب ترین سوخت در توربین‌های بخار و گازی توان بالا مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل افزایش قیمت گاز در سالهای اخیر و مشکل محدود بودن منابع آن و از طرفی ضرورت کاهش آلاینده‌های زیست محیطی، تلاشهایی برای یافتن سوخت جایگزین در توربین‌ها صورت گرفته است. از جمله این سوخت‌ها گاز کوره بلند است که به دلیل حجم نسبت بالای تولید آن می‌تواند به عنوان سوخت در توربین‌های بخار و توربین گاز به صورت جداگانه و یا در یک سیکل ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد.

از جمله سازندگان توربین‌های گازی با سوخت گاز کوره شرکت میتسوبیشی است، که توربین گازی با توان ۳۰۰ مگاوات با سوخت گاز کوره را تولید کرده است. در شکل ۲-۱۴ شماتیکی از تولید همزمان برق و حرارت با استفاده از گاز کوره نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴. تولید همزمان برق و حرارت با استفاده از گاز کوره بلند [۱۲]

جدول ۲-۹. توربین‌های گازی با سوخت گاز کوره (محصولات شرکت میتسوبیشی)

Customer	Application	Start-Up	Model	GT Unit Rating (Incl.G.C)	Combined Plant Rating	Fuel		Combustor
						Main	Stand-By	
NSC (Nippon Steel Co.) Yahata Works	Power Supply	1958	-	850 kW	-	BFG (770kcal/Nm ³)	-	Single-can
NSC Yahata Works	Power Supply	1964	-	4,000 kW	-	BFG (770kcal/Nm ³)	-	Single-can
Sumitomo Metal Co. Wakayama Works	Co-generation (WHB, G-M, BLOWER)	1965	MW171	15,000 kW	-	BFG (750kcal/Nm ³)	-	Single-can
Shikoku Elec. Pwr. Co. Sakaide PS	Combined cycle	1970	MW301	34,000 kW	16,000 kW	COG (750kcal/Nm ³)	-	Multi-can
Mitsubishi Coal Mining Co. Minami Oyubari Plant	Co-generation (with air-preheater)	1970	MW101	9,000 kW	-	Coal mine (4,700kcal/Nm ³)	OIL	Multi-can
NSC Kamaishi Works	Combined cycle with existing STs	1982	M151	16,000 kW	23,000 kW	BFG (670kcal/Nm ³)	OIL	Single-can
Kawasaki Steel Co. Chiba Works	Combined cycle (Single Shaft)	1987	M701	87,400 kW	145,000 kW	BFG/COG (1,000kcal/Nm ³)	-	Multi-can with BP-V
Mitsubishi Gas-Chemical Co. Mizushima-factory	Co-generation (WHB)	1988	MF111	16,250 kW	-	BFG/COG (2,400kcal/Nm ³)	OIL	Multi-can
NSC Hirohata Works	Co-generation (WHB)	1989	M251	30,200 kW	-	LDG (1,815kcal/Nm ³)	OIL	Multi-can
Nissin Steel Co. Kure Works	Combined cycle with existing STs	1989	M251	32,000 kW	50,000 kW	BFG (700kcal/Nm ³)	-	Multi-can with BP-V
Nakayama Steel Co. Funamachi Works	Combined cycle (Single Shaft)	1991	M151	15,000 kW	37,000 kW	BFG/LDG (1,000kcal/Nm ³)	-	Multi-can with BP-V
Mizushima Joint Thermal Power Co.	Combined cycle (Single Shaft)	1994	M501	86,250 kW	145,000 kW	BFG/M (965kcal/Nm ³)	-	Multi-can with BP-V
Fukuyama Joint Thermal Power Co.	Combined cycle (Single Shaft)	1995	M501	86,250 kW	145,000 kW	BFG/M (965kcal/Nm ³)	-	Multi-can with BP-V
UNA Netherlands	Combined cycle (Single Shaft)	1997	M701	87,400 kW	145,000 kW	BFG/COG (1,000kcal/Nm ³)	-	Multi-can with BP-V
NSC Ooita Works	Combined cycle	2001	M251	31,000 kW	65,000 kW	BFG (700kcal/Nm ³)	-	Multi-can with BP-V
Nippon Petroleum Refining Co. Ltd. Negishi Refinery	Combined cycle (Single Shaft)	2003	M701F	295,000 kW	430,000 kW	Syn gas (2,680kcal/Nm ³)	OIL	Multi-can with BP-V
Kimitsu Joint Thermal Power Co.	Combined cycle (Single Shaft)	2004	M701F	180,700kW	300,000 kW	BFG/COG (1,050kcal/Nm ³)	-	Multi-can with BP-V

۲-۵-۳. بازیافت گاز کوره بلند به عنوان عامل احیا در کوره بلند

چنانچه در بخش ۲-۲ اشاره شد، استفاده مجدد از اجزای احیا کننده گاز کوره (H_2 و CO) در کوره بلند به عنوان روشی موثر برای بهبود کارایی کوره و کاهش انتشار اکسید کربن است.

۲-۶. بازیابی حرارت سرباره

در کوره بلندهای مدرن، حدود $0/3-0/25$ تن سرباره مذاب با دمای تقریبی 1450 درجه سانتیگراد به ازای هر تن آهن خام تولید می شود. سیستم بازیابی حرارتی سرباره به دلیل مشکلات تکنولوژیکی و ایمنی تا به حال بصورت تجاری استفاده نشده است. در صورتی که چنین روشی توسعه یابد صرفه جویی معادل با $0/35$ گیگاژول به ازای یک تن چدن مذاب برآورد می شود.

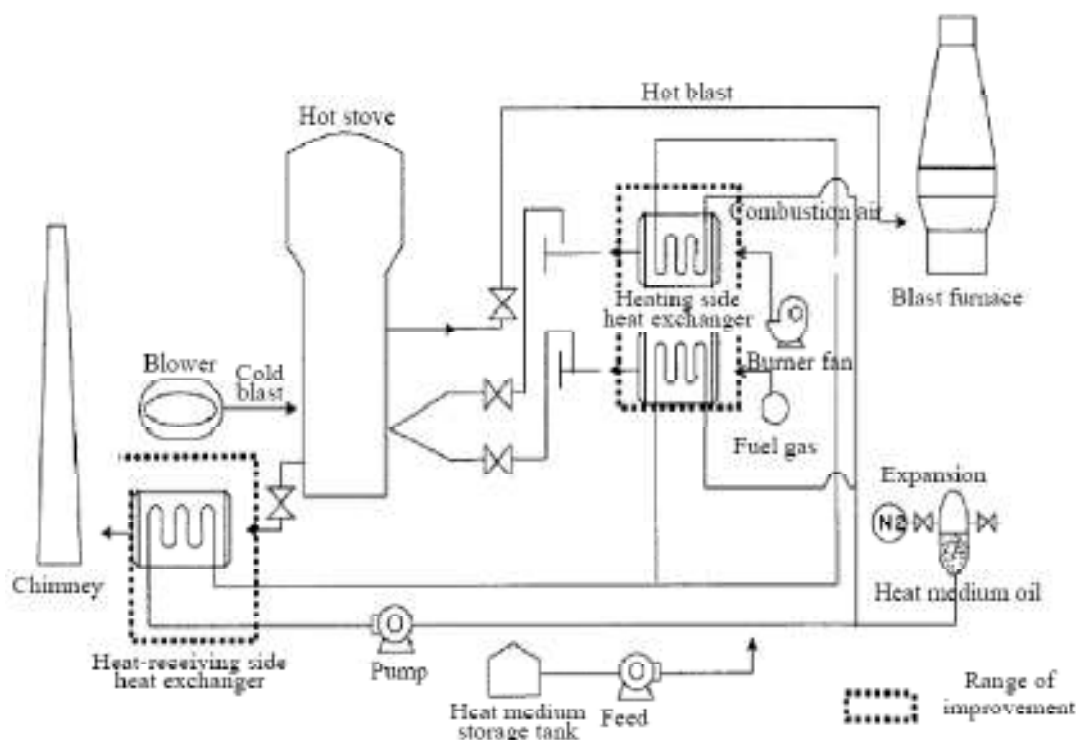
۲-۷. بهینه سازی کائویرها

با توجه به اینکه افزایش دمای هوای دم بیش از هر عامل دیگری به بالا رفتن بازده کوره بلند کمک می کند، لذا استفاده از کائویرها اجتناب ناپذیر است و کنترل نحوه عملکرد مجموعه کائویرها امری ضروری است.

۲-۷-۱. بازیابی دود خروجی از کائویر

دود خروجی از کائویر به دلیل بالا بودن دمای آن (250 درجه سانتیگراد) می تواند در جهت پیش گرم نمودن هوای احتراق کائویر و در نتیجه کاهش مصرف سوخت، بازیابی شود. علاوه بر این سوخت ورودی به کائویر نیز می تواند به وسیله منابع بازیافتی دیگر از جمله گرمای خنک کن های آگلومره پیش گرم شود. [۷] با استفاده از تجهیزات بازیابی حرارت، راندمان احتراق کائویر افزایش و در نتیجه میزان مصرف انرژی کاهش می یابد. در این سیستم از دو مبدل حرارتی استفاده می شود. سیال عامل که معمولاً روغن است در یکی از مبدل ها حرارت موجود در دود خروجی را جذب می کند و در مبدل دوم حرارت جذب شده را به سوخت و هوای احتراق منتقل می نماید. مبدل های حرارتی می توانند از نوع دوار، صفحه ای و لوله ای باشند. با استفاده از این روش می توان $40-50\%$ از انرژی موجود در دود خروجی را بازیابی نمود.

کاهش مصرف سوخت در این روش حدود $0/126$ گیگاژول به ازای تولید یک تن چدن مذاب می باشد. نحوه استفاده از این سیستم در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵. روش اجرایی پیشگرم نمودن سوخت و هوای احتراق در کائوپر [۱۰]

۲-۷-۲. بهبود احتراق در کائوپر

بهبود احتراق به وسیله مشعل‌های پربازده و تنظیم شرایط احتراق (نسبت سوخت/اکسیژن)، صرفه‌جویی انرژی معادل با ۰/۰۴ گیگاژول به ازای یک تن چدن مذاب را به دنبال خواهد داشت.

۲-۷-۳. بهبود کنترل کائوپرها

بهبود سیستم اتوماسیون کوره بلند می‌تواند باعث کاهش مصرف سوخت در کائوپر، افزایش قابلیت اطمینان و افزایش عمر کائوپر گردد.

اجرای این روش در یکی از کارخانه‌های فولاد ایسلند ۶-۷٪ کاهش مصرف گاز طبیعی را به دنبال داشته است. با استفاده از یک مدل کنترلی بهینه می‌توان مصرف سوخت در کائوپر را به حداقل رساند و برنامه زمانبندی مناسبی برای سیکل کاری هر کائوپر در مجموعه کائوپرها ارائه نمود.

۸-۲. بهبود سیستم کنترل کوره بلند

بهبود سیستم کنترل فرایند کوره بلند یکی از موثرترین روشهای کاهش هزینه های انرژی و عملیاتی، و بهینه کردن شرایط کارکرد کوره و کیفیت چدن مذاب می باشد. پیچیدگی عملکرد کوره بلند امروزه با استفاده از سیستم های ابزار دقیق، نرم افزارهای مرتبط و سیستم های اتوماسیون پیشرفته کنترل شده است. استفاده از این سیستم ها این امکان را فراهم می کند که فرایند به صورت on-line مطالعه شده و عملکرد آن قابل پیش بینی باشد. افزایش امکان پیش بینی فرآیند، امکان افزایش میزان تولید، بهینه کردن فرآیند و افزایش عمر کوره بلند را فراهم می کند. این پیشرفت و بهبود برای رقابتی باقی ماندن در صنعت فولاد و آهن امری ضروری است. اخیراً سیستم های کنترلی پیشرفته ای برای کوره بلند ایجاد شده است.

سیستم ابزار دقیق کوره بلند طی ۵۰ سال گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است. با افزایش تقاضا برای چدن مذاب، مانیتورینگ و کنترل عملکرد کوره از اهمیت بیشتری برخوردار گردید. سیستم های کنترلی کوره بلندهای مدرن دارای سطوح مختلفی است که در ادامه توضیح داده می شوند:

سطح صفر: در این سطح پارامترهای فرآیند شامل دما، فشار، دبی و آنالیز مواد به وسیله سیستم ابزار دقیق اندازه گیری و ثبت می شوند. علاوه بر این نظارت بر تجهیزات نیز در این سطح انجام می پذیرد.

سطح ۱: سطح ۱ شامل کنترلر منطقی قابل برنامه ریزی (PLC^1) و سیستم کنترلی گسسته (DSC^2) می باشد. در این سطح داده های خام دریافت شده از سطح صفر پردازش اولیه می شوند. ارتباط اپراتور با این سطح از طریق کامپیوتر و پنل های کنترلی صورت می گیرد. در برخی موارد به پنل های کنترلی به دلیل ارتباط همزمان با سطوح ۱ و ۲، عنوان سطح ۱/۵ نیز اطلاق می شود. با استفاده از این پنل های کنترلی اپراتور قادر است که تمامی بخش های کوره بلند را به همراه روند تغییرات پارامترهای مختلف به صورت صفحات گرافیکی از اتاق کنترل مشاهده نماید.

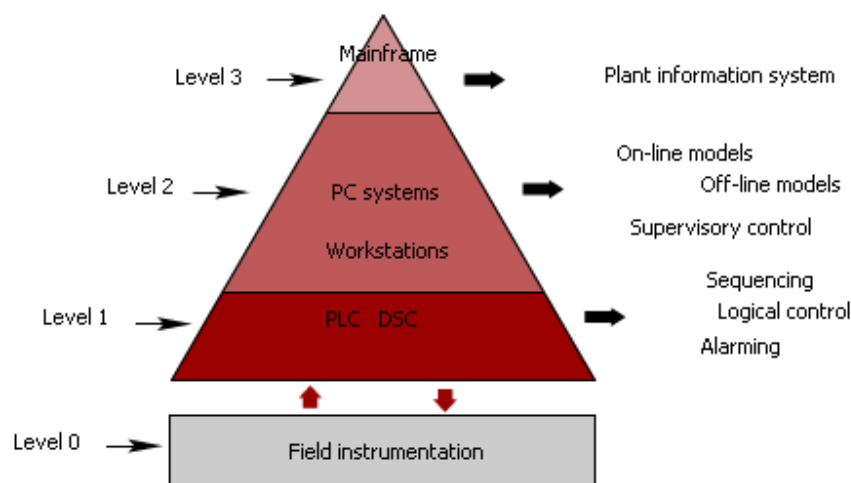
سطح ۲: اطلاعات اساسی و مدل های کنترل و بهینه سازی فرآیند از طریق الگوریتم های rule-based و امکان بررسی تغییرات پارامترها در این سطح قرار گرفته اند. مدل های کنترلی معمول در این سطح عبارتند از کنترل نحوه توزیع بار، محاسبات میزان مواد خام در هر بار، پیش بینی میزان سیلیکون، کنترل سطح مذاب در کوره بلند، آنالیز پوشش نسوز کوره بلند، بهینه سازی کارکرد کائوپرها و بالانس جرم و انرژی.

سطح ۳: وظیفه سطح ۳ که بالاترین سطح کنترلی کوره بلند است، برنامه ریزی تولید برای کل کارخانه بر اساس درخواست و سفارش مشتری و تحویل به موقع آن به مشتری می باشد. علاوه بر این سیستم پیشرفته کنترلی برای پیش بینی وضعیت کوره بلند و کنترل آن در جهت نگهداشتن کوره در وضعیت بهینه کاری در این سطح قرار می گیرد.

¹ Programmable logic controller

² Distributed control system

در شکل ۲-۱۶ ارتباط سطوح کنترلی کوره بلند نشان داده شده است.



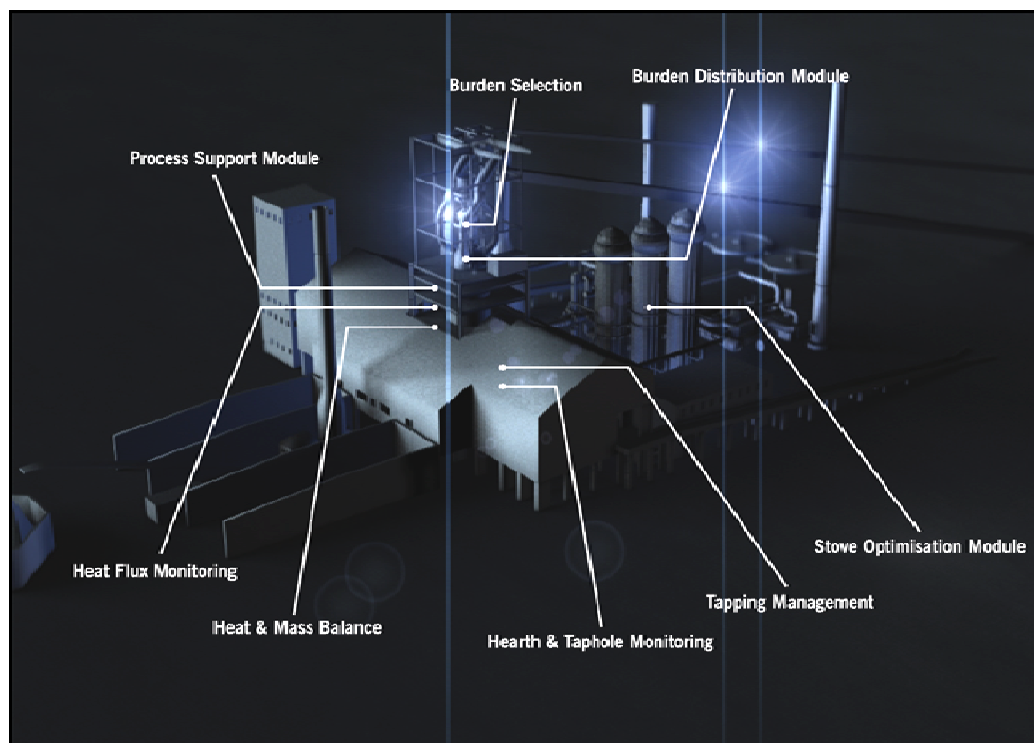
شکل ۲-۱۶. ارتباط سطوح کنترلی کوره بلند [۸]

در ادامه سطح ۲ اتوماسیون کوره بلند و امکانات موجود در آن تشریح خواهد شد.

۲-۸-۲. استفاده از سطح ۲ اتوماسیون برای کنترل عملیات کوره بلند [۱۳]

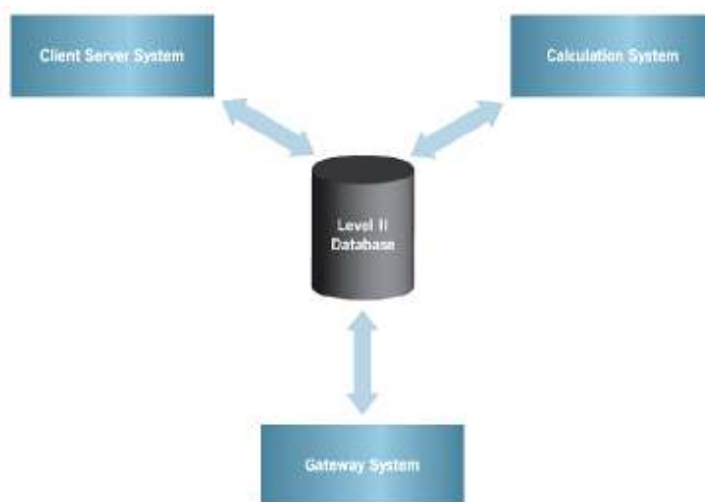
سطح ۲ اتوماسیون به شیوه‌های مختلفی تعریف شده است ولی تعریف آن در صنعت به معنای سیستم نظارت بر تولید است، هر چند نظارت بر تولید تنها بخشی از آنچه سیستم سطح ۲ قادر به انجام آن است، می‌باشد. زمانی که این سیستم با یک انتخاب درست از ابزار دقیق و یک اپراتور متخصص کوپل شود، می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند برای بهبود مستمر تولید، مانیتورینگ وضعیت و نظارت بر سلسله عملیات کوره بلند تلقی شود. لازم به ذکر است که این سطح کنترلی نمی‌تواند به عنوان ابزاری برای جایگزین کردن اپراتور استفاده شود ولی اپراتور با یادگیری چگونگی استفاده از آن درک بهتری از مسائل مختلف کوره بلند خواهد داشت. سیستم سطح ۲ با استفاده از PLC با سطح ۱ مرتبط می‌شود و در صورت لزوم با سطح ۳ نیز می‌تواند در ارتباط باشد.

سیستم سطح ۲ یک رویکرد مدولار با ماژول‌های اختصاصی برای انجام بهینه عملیات در مناطق مختلف کوره بلند می‌باشد. با وجود اینکه هر ماژول مربوط به قسمت مجزایی در کوره بلند است ولی ماژول‌های مختلف با یکدیگر هم‌پوشانی دارند، به این معنا که برای استفاده از همه پتانسیل سیستم، ماژول‌ها نیاز به تعامل با یکدیگر را دارند. ماژول‌های اصلی سطح ۲ کوره بلند در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۷. ماژول های کنترلی در سیستم سطح ۲ اتوماسیون کوره بلند

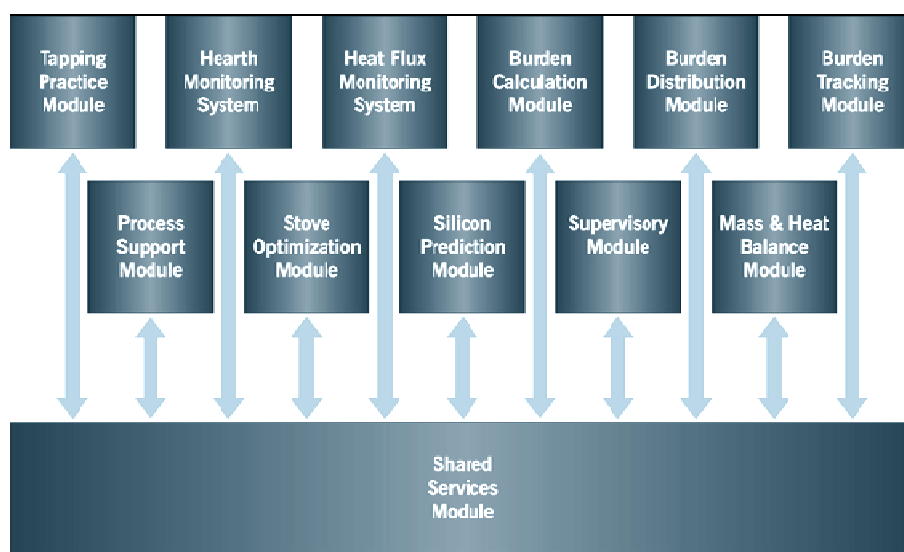
شکل ۲-۱۸ نحوه ارتباط سطح ۲ با سطح ۱ و اپراتور را به صورت کلی نشان می دهد.



شکل ۲-۱۸. نحوه ارتباط سطح ۲ اتوماسیون با سطح ۱ اتوماسیون و اپراتور

سطح ۲ داده‌های خام را توسط سیستم Gateway از سطح ۱ دریافت و توسط سیستم Calculation آنها را پردازش می‌کند و در نهایت به وسیله سیستم Client Server در اختیار اپراتور قرار می‌دهد. در این سیستم روند کار کوره بلند را در بازه‌های زمانی قابل تعریف می‌توان رویت نمود. ماژول‌هایی که سطح ۲ را تشکیل می‌دهند بر روی Client Server اجرا می‌شود.

ماژول‌های سطح ۲ در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود ارتباط ماژول‌های مختلف از طریق ماژول مرکزی SSM^۱ صورت می‌پذیرد.



شکل ۲-۱۹. ماژول‌های مختلف در سطح ۲ اتوماسیون کوره بلند

در ادامه توضیح مختصری در مورد هر یک از ماژول‌های کنترلی داده می‌شود.

۲-۲-۸-۲. ماژول‌های نظارتی (Supervisory Module)

این ماژول‌ها برای پوشش دادن همه جنبه‌های عملیاتی کوره بلند و اعمال کنترل‌های لازم برای رسیدن کوره بلند به بیشترین ظرفیت تولید و افزایش عمر کوره بلند طراحی شده است.

۲-۲-۸-۳. ماژول پشتیبان فرایند (PSM^۲)

این ماژول کلیدی، پارامترهای اصلی کوره بلند را به صورت روزانه محاسبه کرده و نمایش می‌دهد. این پارامترها

^۱ Shared Service Module

^۲ Process Support Module

شامل حجم گاز کوره بلند، راندمان کوره بلند، نرخ توزیع بار، پروفیل دمایی در داخل کوره بلند، فشار داخل کوره، مقاومت بار داخل کوره، نرخ احیا، دمای آدیاباتیک شعله، نرخ اکسیژن و نرخ تولید می باشد.

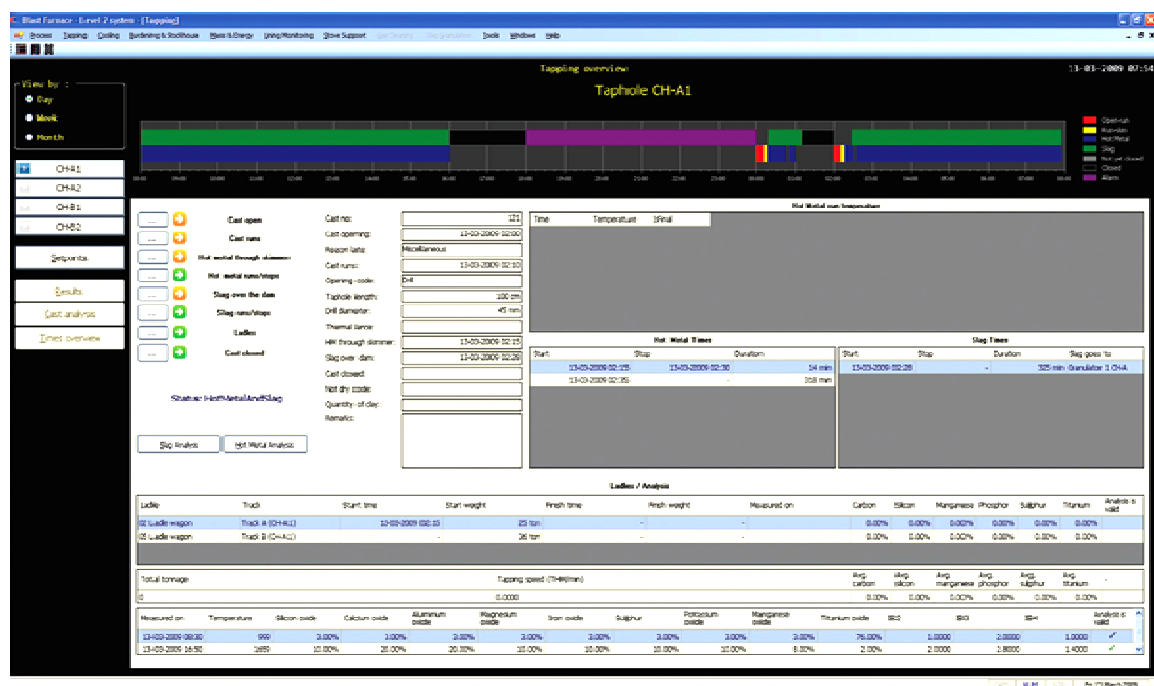
این ماژول به منظور تسهیل پلات گرفتن از روند تغییر پارامترهای مختلف کوره بلند در بازه های زمانی بلند مدت و در نتیجه ارزیابی سریع فرآیند توسط اپراتور طراحی شده است. به این ترتیب تجزیه و تحلیل عملکرد کوره بلند در بازه های زمانی دلخواه امکانپذیر می باشد. در کوره بلندهایی با شرایط نرمال کاری، این پروسه تنها به زمان ۱ یا ۲ دقیقه ای نیاز دارد.

۴-۲-۸-۲. ماژول بهره برداری (TPM^۱)

این ماژول داده های بهره برداری که به صورت دستی ثبت می شوند و اطلاعاتی که از اتوماسیون سطح ۱ انتقال داده می شود را به منظور ارائه گزارشی از وضعیت سیستم برای مدیریت همه جانبه تولید چدن مذاب ترکیب می کند. این اطلاعات شامل زمان تخلیه مذاب، آنالیز چدن و سرباره، قطر drill و طول taphole می باشند. این اطلاعات در صفحات مختلف قابل نمایش هستند، به گونه ای که وضعیت کوره بلند در یک نگاه قابل ارزیابی باشد. (شکل ۲-۲۰)

با استفاده از خروجی این ماژول می توان گزارش عملکرد بهره برداری روزانه کوره بلند که دربرگیرنده تمام اطلاعات کلیدی کوره بلند است و ممکن است در جلسه مدیریتی صبح مطرح شود، را تهیه نمود.

^۱ Tapping Module



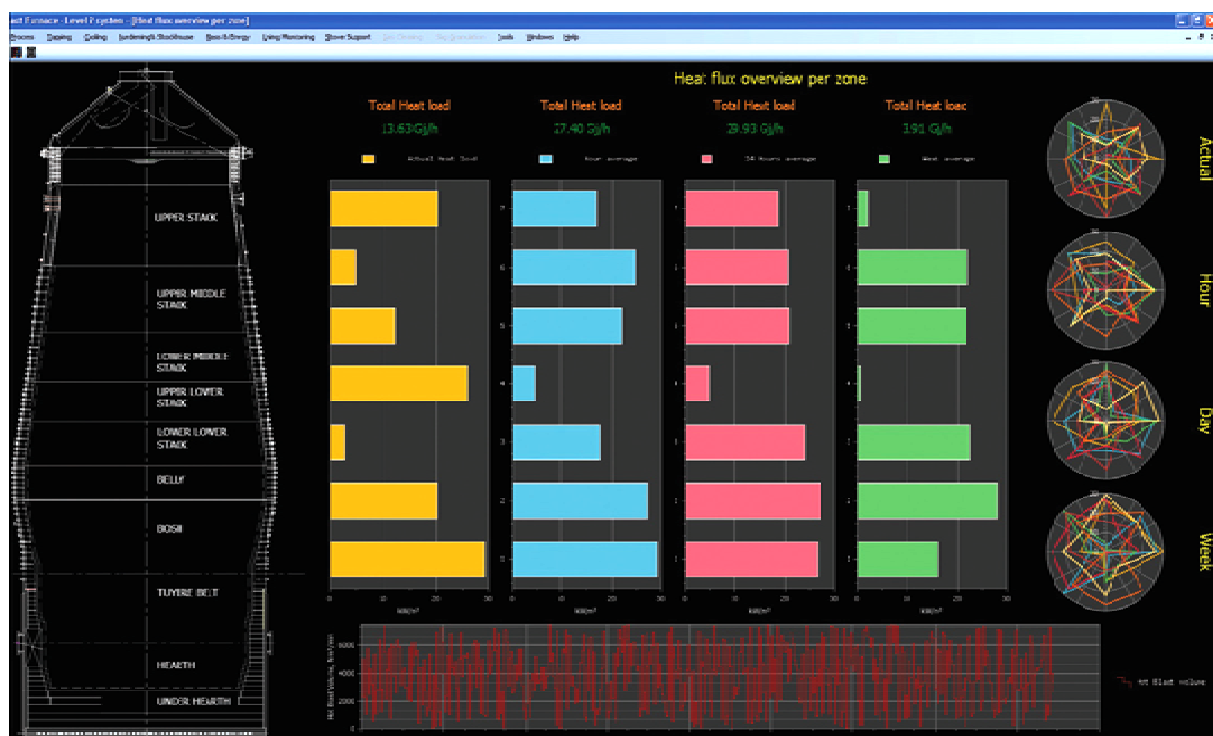
شکل ۲-۲۰. نمونه‌ای از صفحات نمایش ماژول بهره‌برداری

۵-۲-۸-۲. سیستم جریان حرارتی (HFS)

این سیستم تلفات حرارتی از قسمت‌های مختلف کوره شامل سیستم خنک‌کننده، فرم‌ها و بوته را محاسبه می‌کند. دبی و دمای آب رفت و برگشت و میزان تلفات حرارتی محاسبه شده در هر قسمت توسط این سیستم گزارش می‌شوند.

(شکل ۲-۲۱)

¹ Heat Flux System



شکل ۲-۲۱. نمونه‌ای از صفحات نمایش سیستم جریان حرارتی

با استفاده از این ماژول می‌توان ارزیابی سریعی از تلفات حرارتی از بدنه کوره را داشت. علاوه بر این می‌توان در میزان تلفات حرارتی در بخش‌های مختلف کوره از جمله بوته، شکم و یا ارتفاع‌های مختلف از تنوره کوره را مشاهده و تجزیه و تحلیل نمود.

۶-۲-۸-۲. ماژول پیش‌بینی کننده سیلیس (SPM^۱)

اپراتور با استفاده از هشدارهای این ماژول، رژیم حرارتی کوره را تغییر می‌دهد. تغییر رژیم حرارتی کوره با استفاده از تغییر در پارامترهای مختلف از جمله نرخ تزریق زغال، درجه حرارت هوای دمشی و مقدار تزریق بخار اضافی برای کنترل درجه حرارت کوره صورت می‌گیرد. به این ترتیب میزان سیلیس چدن مذاب قابل کنترل است. پیش‌بینی میزان سیلیس با استفاده از نتایج حاصل از روابط بالانس جرم و انرژی و داده‌های واقعی عملیاتی انجام می‌شود.

۷-۲-۸-۲. مدل بالانس جرم و انرژی (MHB^۲)

مدل بالانس جرم و انرژی دربرگیرنده حجم زیادی از اطلاعات فنی است. هدف از این مدل ارزیابی دقیق عملکرد

^۱ Silicon Prediction Model

^۲ Mass & Heat Balance

کوره بلند با در نظر گرفتن تمام پارامترهای عملیاتی است. مقادیر واقعی این پارامترها به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شوند و نتایج مدل با عملکرد واقعی کوره بلند مقایسه می‌شود. بسته به میزان اختلاف این مقادیر ممکن است میزان ورودی‌های کوره تغییر داده شوند و یا نتایج می‌توانند جهت ارزیابی فرایند مورد استفاده قرار گیرند.

علاوه بر این، مدل بالانس جرم و انرژی این امکان را به کاربر می‌دهد که تاثیر برخی از پارامترهای ورودی به کوره را بر روی عملکرد آن مشاهده کند. همچنین با استفاده از این مدل می‌توان میزان هوای دمشی مورد نیاز برای تولید حجم مشخصی از چدن را تعیین نمود.

با استفاده از این توابع اپراتور می‌تواند تاثیر تغییرات عملیاتی و اقدامات کنترلی لازم را پیش‌بینی کند و پارامترهای متعددی را تجزیه و تحلیل نماید. از جمله این پارامترها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

راندمان کوره بلند، افت فشار کوره، نرخ کک، نرخ تزریق زغال، نرخ تولید سرباره، میزان احیا، دمای هوای دمشی، میزان اکسیژن تزریقی به هوای دمشی، میزان بخار اضافی، دما و نرخ و ارزش حرارتی گاز کوره بلند، فشار کوره، تلفات حرارتی ناشی از خنک‌کنندگی، ترکیب شیمیایی چدن مذاب.

۸-۲-۸-۲. مدل محاسبات بار (BCM^1)

این مدل با استفاده از وزن و ترکیب مواد شارژ شده مقدار و ترکیب چدن و سرباره را محاسبه می‌کند. این ماژول به اپراتور این امکان را می‌دهد که خصوصیات بار را محاسبه و ترکیب شارژ را برای رسیدن به شرایط بهینه از نظر بازسیته سرباره و درصد آلومینای آن تعیین نماید.

۹-۲-۸-۲. ماژول ردیابی بار (BTM^2)

با استفاده از این ماژول موقعیت هر شارژ درون کوره پیش‌بینی می‌شود. این کار از طریق برقرار کردن بالانس حجمی بین حجم شارژ با سطح stockline انجام می‌شود. در هر حجم بار از طریق بالانس بار، میزان سرباره تولیدی و نرخ کک مورد نیاز محاسبه می‌شود که با استفاده از آن ویژگی‌های واقعی که هر بار باید بر اساس آن تنظیم شود، تعیین می‌شود. نتایج محاسبات به صورت گراف و یا جدول نمایش داده می‌شود و به اپراتور اجازه می‌دهد هر شارژ را در داخل کوره دنبال کند و بتواند حدس بزند که این شارژ چه زمانی به منطقه ذوب می‌رسد. این ابزار برای اعمال تغییرات صحیح در ویژگی‌های هوای دمشی و نرخ تزریق زغال به کوره بر اساس بار واقعی در حال ذوب استفاده می‌شود.

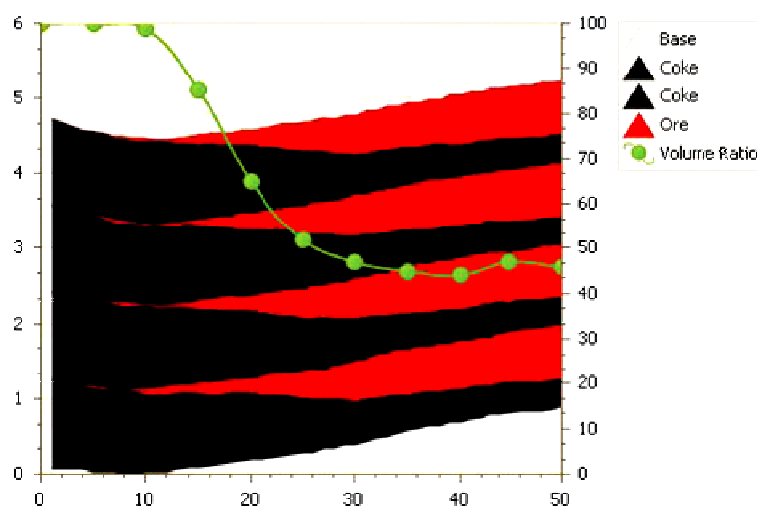
¹ Burden Calculation Model

² Burden Tracing Module

۸-۲-۱۰. مدل توزیع بار (BDM^۱)

این ابزار برای مشاهده نحوه توزیع کک و سنگ آهن در کوره، مورد استفاده قرار می گیرد. بارگیری کوره بلند بر اساس برنامه پرکردن آن مشخص می شود. برنامه پر کردن کوره شامل ترتیب اسکیپ های کک، سنگ آهن و یا مخلوط این دو به همراه تنظیمات شارژ از بالای کوره توسط اپراتور است که به شکل یک جدول شامل نوع، وزن و موقعیت شارژ، ارائه می شود.

مثالی از خروجی این مدل در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است. محور افقی در این گراف نشان دهنده نیمی از قطر گلوگاه کوره و محور عمودی، نشان دهنده ارتفاع مواد در گلوگاه است. با استفاده از خروجی این مدل می توان نسبت سنگ آهن به کک در سراسر قطر گلوگاه را نیز محاسبه و نمایش داد. این شکل تشکیل لایه های کک (مشکی رنگ) و سنگ آهن (قرمز رنگ) در یک برنامه پر کردن کوره بر روی لایه قبلی (سفید رنگ) را نشان می دهد.



شکل ۲-۲۲. نمونه ای از خروجی مدل توزیع بار

۸-۲-۱۱. سیستم مانیتورینگ کوره (HMS^۲)

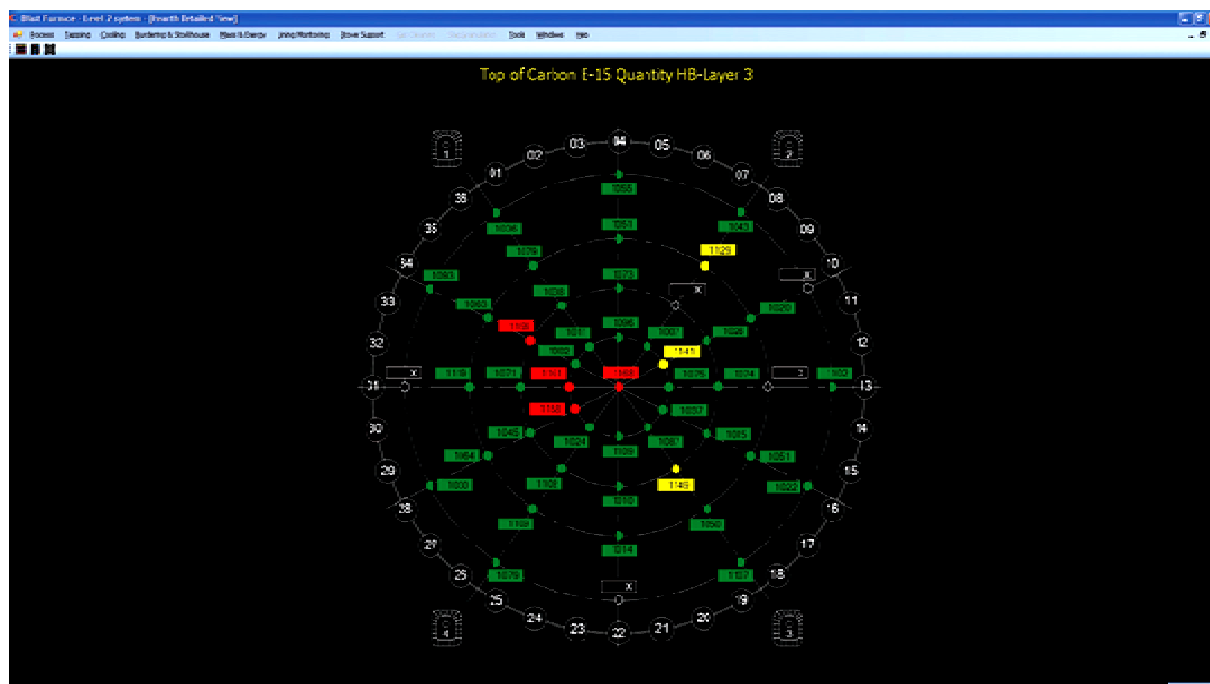
این سیستم به منظور نمایش دما در مناطق مختلف کوره که با استفاده از ترموکوپل های نصب شده در بوته، دیواره های کناری و taphole اندازه گیری می شود، استفاده می گردد. از آنجا که عمر کوره با توجه به عمر بوته آن تعیین می شود، تعداد ترموکوپل های این منطقه بیشتر از سایر مناطق است.

ترموکوپل ها به گونه ای قرار گرفته اند که شار حرارتی از نسوزهای کوره را بتوان هم در جهت عمودی و هم در جهت

^۱ Burden Distribution Model

^۲ Hearth Monitoring System

افقی محاسبه نمود. شکل ۲-۲۳ محل قرارگیری ترموکوپل های کوره را نشان می دهد.



شکل ۲-۲۳. نمونه ای از خروجی سیستم مانیتورینگ کوره

این سیستم به منظور کنترل دمای بدنه کوره و بررسی وضعیت عایق های داخلی کوره و سیستم خنک کنندگی آن استفاده می شود. زمانی که ترموکوپل ها دمایی بیشتر از دمای مجاز را نشان دهند رنگ نشانگرها به حالت هشدار درآمده و باید دمای کوره کنترل شود. لازم به ذکر است که با گذشت زمان ماکزیمم دمای مجاز کاهش می یابد. این سیستم دارای حداقل تعامل با ماژول های دیگر است و به صورت مستقل عمل می کند و ابزاری مفید برای تضمین افزایش طول عمر کوره بلند بدون نیاز به دخالت اپراتور و سیستم کنترل می باشد.

۱۲-۲-۸-۲. مانیتورینگ پوشش داخلی کوره (SLM)^۱

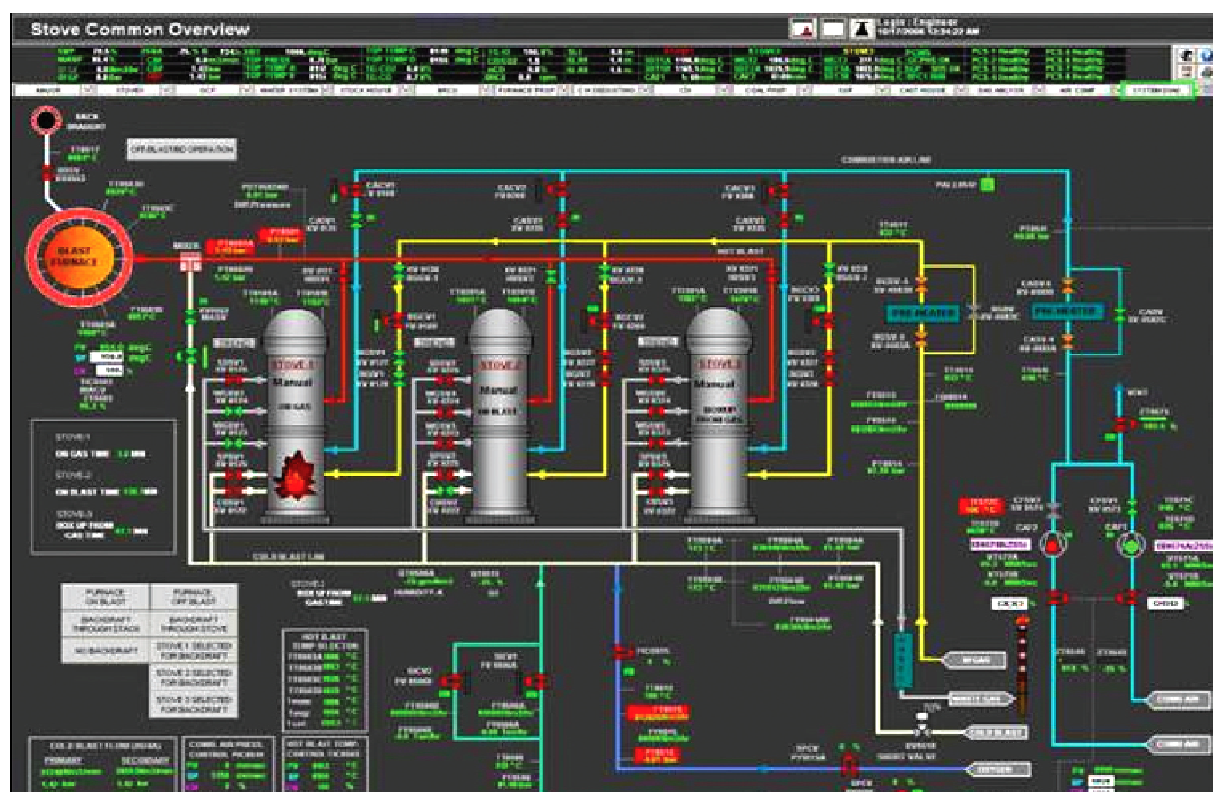
این سیستم ابزارهای مورد نیاز برای ارزیابی صحیح وضعیت حرارتی پوشش داخلی کوره را در اختیار اپراتور قرار می دهد. تجزیه و تحلیل هر وضعیتی که به کوتاه شدن عمر پوشش کوره منجر می شود از اهمیت ویژه ای برخوردار است و باید اقدامات اصلاحی در این خصوص صورت گیرد.

^۱ Stack Lining Monitoring

داده‌های این سیستم به طور معمول به صورت گراف‌های هشت ساعته، یک روزه و یا بیشتر نمایش داده می‌شود. داده‌ها به صورت آنلاین تجزیه و تحلیل می‌شوند و پارامترهایی مانند حداکثر مقدار روزانه، حداکثر نوسان روزانه، مقدار متوسط روزانه و تعداد نوسانات بالاتر از یک سطح مشخص شده، بررسی می‌شوند.

۲-۸-۱۳. مدل کنترل بهینه کائوپر (SOM)^۱

این مدل به منظور ارتقاء سیستم کنترل نیمه اتوماتیک کائوپر مورد استفاده قرار می‌گیرد و سبب افزایش راندمان کائوپر خواهد شد. در واقع این سیستم برای تصمیم‌گیری در مورد نحوه انتخاب اینکه کدام یک از کائوپرها وارد مدار شود مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای شرایط خاص مانند زمان تعمیرات و نگهداری و یا زمان چک کردن کائوپرها، سیستم به طور دستی قطع می‌شود ولی در شرایط نرمال هدف سیستم، افزایش راندمان سیستم کائوپرهاست. نمونه‌ای از صفحه نمایش این سیستم در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۴. نمونه‌ای از خروجی مدل کنترل بهینه کائوپر

^۱ Stove Optimisation Model

این مدل این امکان را فراهم می‌کند که بدون نیاز به حضور مداوم اپراتور، هوای دمشی مورد نیاز با دمای مناسب به کوره بلند تحویل داده شود. علاوه بر این، پاسخ سریع به تغییرات در عملکرد کوره بلند را خواهد داد. خصوصیت اصلی این مدل کنترل بهینه بالانس حرارتی بین کائوپرهاست. به این معنا که زمانی که پارامترهای عملیاتی کائوپرها تغییر می‌کند، سیستم کنترل به صورت اتوماتیک شرایط را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که کائوپرها شرایط نسبتاً پایداری را داشته باشند. با استفاده از این سیستم راندمان حرارتی کائوپرها را می‌توان ۲ تا ۴٪ افزایش داد. به طور یقین، مهم‌ترین هدف این سیستم کنترلی بهینه‌سازی اقتصادی است. در کائوپرهای مدرن، دمای گنبد و در نتیجه دمای شعله با تغییر مقدار گاز طبیعی تزریق شده به گاز کوره کنترل می‌شود. در بیشتر موارد هزینه این گاز تزریقی بیشتر از قیمت گاز کوره است. با کاهش تزریق گاز می‌توان به حالت بهینه‌ای برای راندمان حرارتی و راندمان اقتصادی سیستم کائوپرها دست یافت.

۸-۲-۱۴. سیستم کنترل و نظارت اپراتور (OACS)

با استفاده از این سیستم اختلال در عملکرد کوره در مرحله ابتدایی شناسایی می‌شوند. همچنین از این سیستم می‌توان در جهت مقایسه عملکرد کوره در گذشته به منظور جلوگیری از حوادث پرخطر و پرهزینه استفاده نمود. علاوه بر این اقدامات صحیح لازم برای نگه داشتن کوره در بهینه‌ترین و اقتصادی‌ترین شرایط کارکرد را به اپراتور بیان می‌کند. OACS به طور مداوم داده‌های واقعی را از طریق سطح ۱ اتوماسیون جمع‌آوری و پیوستگی فرایند را چک می‌کند. داده‌های جمع‌آوری و محاسبه شده به طور پیوسته تجزیه و تحلیل می‌شوند و در صورت بروز هر گونه بی‌نظمی و یا اتفاقات غیرمنتظره، علت و راه‌حل‌های ممکن را توضیح می‌دهد. این سیستم ابزاری مفید و قابل اطمینان برای افزایش پایداری و تولید ارائه می‌کند.

۸-۲-۳. کنترل کیفیت چدن مذاب کوره بلند با استفاده از نرم افزار [۱۴]

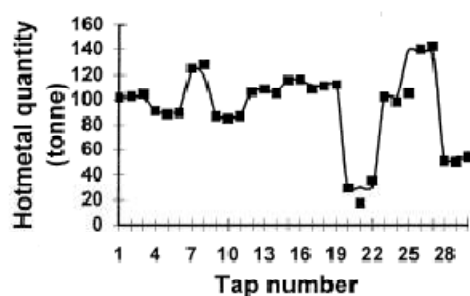
بهره‌برداری و کنترل عملکرد کوره بلند به دلیل مشکلات کنترلی و اندازه‌گیری‌های پیچیده، همواره به عنوان یک چالش بزرگ مطرح بوده است. آنالیز ترکیب چدن مذاب به منظور عملکرد بهینه کوره از دیدگاه اقتصادی از اهمیت خاصی برخوردار است. با توجه به اینکه آنالیز چدن مذاب و سرباره نیاز به تکنیک‌های طیف‌سنجی دارد، این آنالیز توسط دستگاه اسپکتروسکوپی به صورت آزمایشگاهی و تنها به صورت آفلاین (off-line) انجام می‌شود، در نتیجه امکان

¹ Operator Advisory & Control System

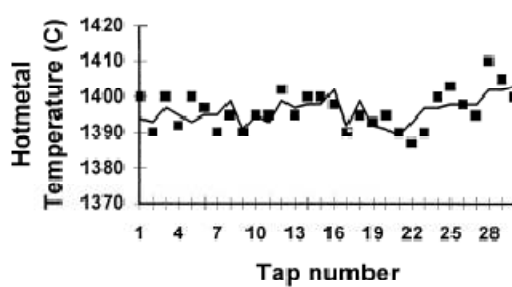
کنترل بسیاری از پارامترها به صورت آنلاین (on-line) وجود ندارد. مقدار چدن و سرباره در هر بار تخلیه، نیز از مهم‌ترین اطلاعات لازم برای کنترل عملکرد کوره بلند است که امکان اندازه‌گیری آنلاین آن وجود ندارد. از طرفی به دلیل اینکه زمان انجام واکنش احیا طولانی است، مواد مدت زیادی در داخل کوره باقی می‌مانند و تاخیر زیادی بین ورودی مواد خام تا خروجی مواد مذاب وجود دارد. همه این دلایل باعث پیچیدگی مسائل کنترلی در کوره بلند می‌شوند. تنها عمل کنترلی ممکن، جهت کنترل آنلاین کیفیت و مقدار چدن مذاب و سرباره استفاده از یک مدل بر پایه کنترل پیش‌بینی کننده می‌باشد. یک مدل کنترلی نیاز به اندازه‌گیری آنلاین متغیرهای کنترل شده دارد. در کوره بلند متغیرهای کنترل شده آنالیز و مقدار متغیرهایی است که امکان اندازه‌گیری آنها به صورت آنلاین وجود ندارد. روش جایگزین برای اندازه‌گیری آنلاین استفاده از تکنیک soft sensor است. در تکنیک soft-sensor متغیرهایی که به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند با استفاده از یک مدل مناسب به متغیرهای فرایندی دیگر که به صورت آنلاین قابل اندازه‌گیری هستند ارتباط داده می‌شود. این متغیرها در بیشتر موارد، دما، فشار و جریان هستند که به صورت آنلاین و به وسیله ابزار دقیق اندازه‌گیری می‌شوند. ارتباط پیچیده بین متغیرهای اندازه‌گیری شده و متغیرهای مورد نظر با استفاده از یک تکنیک مناسب مدل می‌شود.

تاکنون تلاشهای زیادی برای مدل کردن کوره بلند انجام شده است. پیچیدگی فرایندهای انتقال جرم و حرارت و وابستگی آنها به یکدیگر، تعدد واکنشهای بین فازهای گاز-جامد، جامد-جامد و جامد-مایع، فرایند احتراق و انتقال جرم interphase، باعث پیچیدگی زیاد مسئله مدل کردن کوره می‌شود.

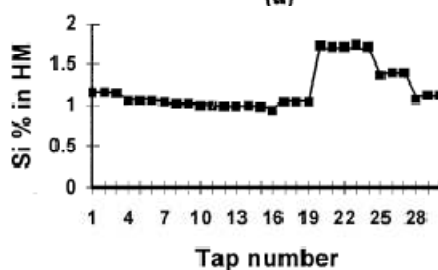
با توجه به پیچیدگی زیاد مدل کردن کوره بلند، استفاده از روش شبکه عصبی از جذابیت خاصی برخوردار است. در این روش با استفاده از پارامترهایی که قابل اندازه‌گیری بصورت آنلاین هستند، اطلاعاتی مانند آنالیز چدن با دقت بالایی قابل پیش‌بینی خواهد بود. با استفاده از این Soft Sensor می‌توان متغیرها را با خطای کمتر از ۳٪ پیش‌بینی کرد. استفاده از این روش هوشمند باعث بهبود قابل توجه کیفیت چدن مذاب از نظر مقدار سیلیس و گوگرد آن می‌شود. نمونه‌ای از پیش‌بینی پارامترهای خروجی کوره بلند با استفاده از شبکه عصبی در شکل ۲-۲۵ و شکل ۲-۲۶ ارائه شده است.



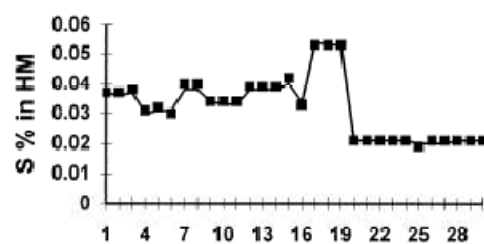
(a)



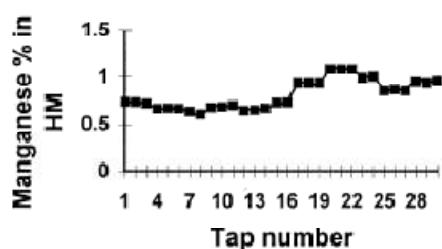
(b)



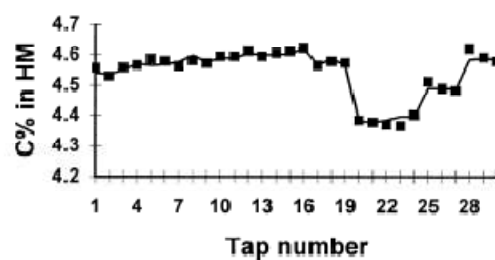
(c)



(d)

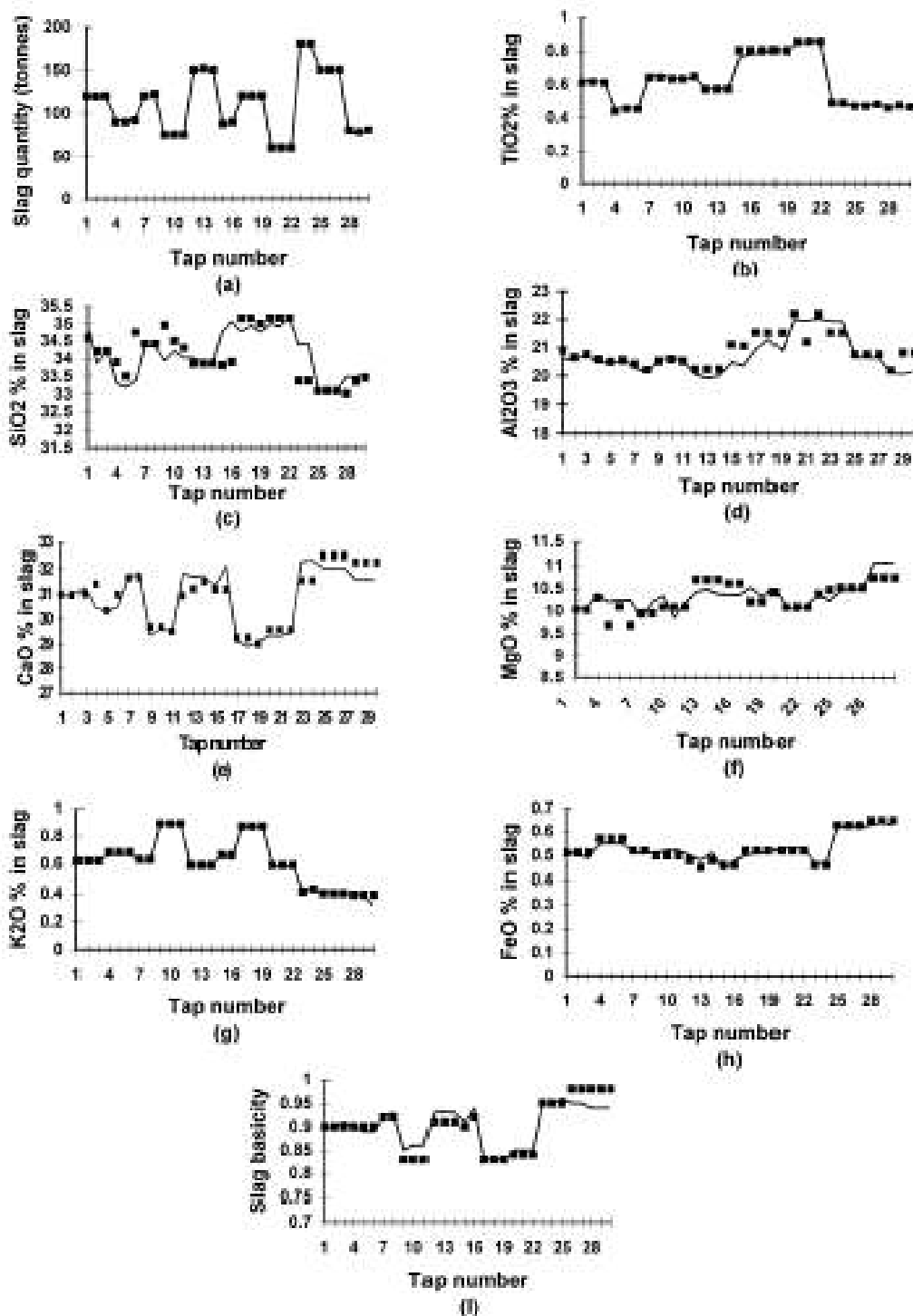


(e)



(f)

شکل ۲-۲۵. اعتبارسنجی مدل تهیه شده برای مشخصات چند مذاب ■ : داده‌های واقعی، - : پیش‌بینی مدل



شکل ۲-۲۶. اعتبارسنجی مدل تهیه شده برای مشخصات سرباره ■ : داده‌های واقعی، - : پیش‌بینی مدل

نتیجه گیری

در این گزارش ابتدا عوامل موثر بر مصرف انرژی کوره بلند شامل عوامل درون واحدی و برون واحدی مورد بررسی قرار گرفت. از مهم ترین این عوامل می توان به کیفیت کک ورودی، میزان بازیافت گاز کوره بلند، میزان مواد سرباره ساز ورودی و ترکیب شیمیایی چدن مذاب اشاره نمود.

پس از آن به ارائه راهکارهایی در جهت کاهش مصرف انرژی کوره بلند پرداخته شده است. از مهم ترین این راهکارها می توان به تزریق پودر زغال به کوره بلند، بازیافت کامل گاز کوره بلند و بهبود سیستم اتوماسیون کوره بلند اشاره نمود.

مراجع

- [1] "Blast Furnace Ironmaking" Volume One:, Principle,design and Raw Material" JUNE,,1999
- [۲] م.مهری، م. طباطبایی، م.پوری شعبان. " بررسی ارتباط ری اکتیویته و قلیابیت خاکستر کک متالورژی در شبیه سازی رفتار کک در کوره بلند به منظور تعیین مقدار عددی شاخص های CRI و CSR "، سمپوزیوم فولاد ۱۳۸۶.
- [3] Metallurgical Coal and Coke Testing,SGS Mineral Service.
- [4] A.Babich, H.W.Gudenau, A.Formoso, K.Mavrommatis, C.Froehling, L.Garcia, "Choice of Technological Regimes of a Blast Furnace Operation with Injection of Hot Reducing Gases".
- [5] A. Ziebig, W. Stanek, " Forecasting of the energy effects of injecting plastic wastes into the blast furnace in comparison with other auxiliary fuels", *Journal of Energy*, 2001
- [6] "Integrated Pollution Prevention and Control Draft Reference Document on Best Available Techniques for the **Production of Iron and Steel**", 2009
- [7] E. Worrell, P. Blinde, M. Neelis, E. Blomen, & E. Masanet, "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry", *Energy Analysis Department Environmental Energy Technologies Division Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory University of California*, 2010.
- [8] www.steeluniversity.org
- [9] www.brain-c-jcoal.info, Pulverized Coal Injection for Blast Furnaces. 2011
- [10] "Japanese Technologies for Energy Savings/GHG Emissions Reduction", by New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), 2008
- [11] M. CHU, H. NOGAMI & J. YAGI, "Numerical Analysis on Charging Carbon Composite Agglomerates into Blast Furnace", *ISIJ International*, Vol. 44 (2004), No. 3, pp. 510–517
- [12] T. KOMORI, H. HARA, H. ARIMURA and Y. KITAUCHI, "Design for F Class Blast Furnace Gas Firing 300 MW Gas Turbine Combined Cycle Plant", *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*, 2003 Tokyo
- [13] J. Wise, R. Mijnen, G. Jan Gravemaker & J. Plooi, "Blast furnace level 2 monitoring and control system: giving the operators the tools to become the experts of the future" , MILLENNIUM STEEL, 2010.
- [14] V.R. Radhakrishnan, A.R. Mohamed, "Neural networks for the identification and control of

blast furnace hot metal quality”, Journal of Process Control, 2000.