



دانشگاه مهندسی معدن – دانشگاه تهران
گروه فرآوری مواد معدنی

فرآیندهای تولید کک، گندله و سیمان

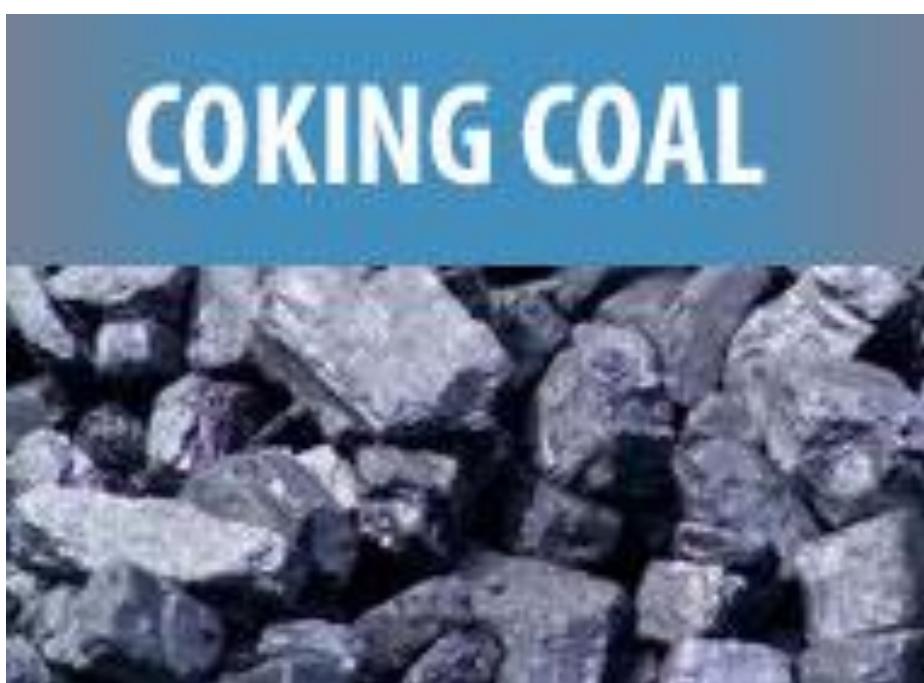
تهییه و تنظیم:

دکتر هادی عبداللّهی

دوره کارشناسی مهندسی معدن – گرایش فرآوری مواد معدنی

صفحه سفید می‌باشد.

فرآیند تولید کک



۱- فرآیند تولید کک

۱-۱- مقدمه

کک سازی عبارت است از حرارت دادن زغال سنگ حاصل از نوع کک شو در محیطی عاری از اکسیژن و خارج کردن مواد فرار و تبدیل آن به جسمی مستحکم تر با ترکیب شیمیائی یکنواخت برای استفاده در کوره‌های ذوب فلزات. تولید کک دارای سابقه چندین صد ساله است ولی به طور مدون و به منظور استفاده در صنعت، دویست سال است که کک تولید می‌شود. استفاده صحیح و واقعی از کک، تقریباً یکصد سال است که آغاز شده است. در طول این مدت، هرچند آهنگ توسعه روش‌های تولید کک، کند بوده ولی در سالهای اخیر، روش‌های مختلف کک سازی (سنگی و صنعتی)، به سرعت پیشرفت نموده است. بخش عمده کک‌های متالورژیکی در کوره‌های بلند و مابقی آن در صنایع ریخته‌گری، فروآلیاژها، قندسازی، لاستیک، الکترودسانسی و... مصرف می‌شوند. این نوع کک، معمولاً از زغال‌سنگ‌های مرغوب تحت شرایط کربونیزه کردن آرام بدست می‌آید. در فرآیند تهیه این نوع کک، تاکید عمده بر روی ابعاد بزرگ، استحکام زیاد و میل ترکیبی کم می‌باشد.

خواص عمده‌ای که از نظر صنعتی در این نوع کک مورد نظر می‌باشد، عبارتند از:

- میزان رطوبت،

- میان خاکستر،

- میزان مواد فرار،

- وزن مخصوص و تخلخل،

- دانه بندی،

- استحکام و میل ترکیبی با اکسیژن،

کک برای هر منظوری که به کار می‌رود، استحکام دانه‌های آن بایستی زیاد باشد تا هنگامی که رویهم ریخته می‌شود، دانه‌ها شکسته و خرد نشوند. وزن مخصوص و میزان تخلخل کک نیز حائز اهمیت بوده که هم بر روی زمان سوت و هم در زمان حمل و نقل، تاثیر زیاد دارد.

کوره‌های کک سازی به دو صورت گرم کردن مستقیم یا غیرمستقیم وجود دارند. در گرم کردن مستقیم از احتراق مواد فرار حاصل از عملیات ککسازی در جهت حرارت دادن زغال سنگ استفاده می‌گردد. در گرم کردن غیرمستقیم، از انرژی حرارتی گازهای حاصل از احتراق مواد فرار در رکوپراتور، رژنراتور و دیگهای بخار استفاده شده و باطریهای کک سازی را گرم می‌کنند.

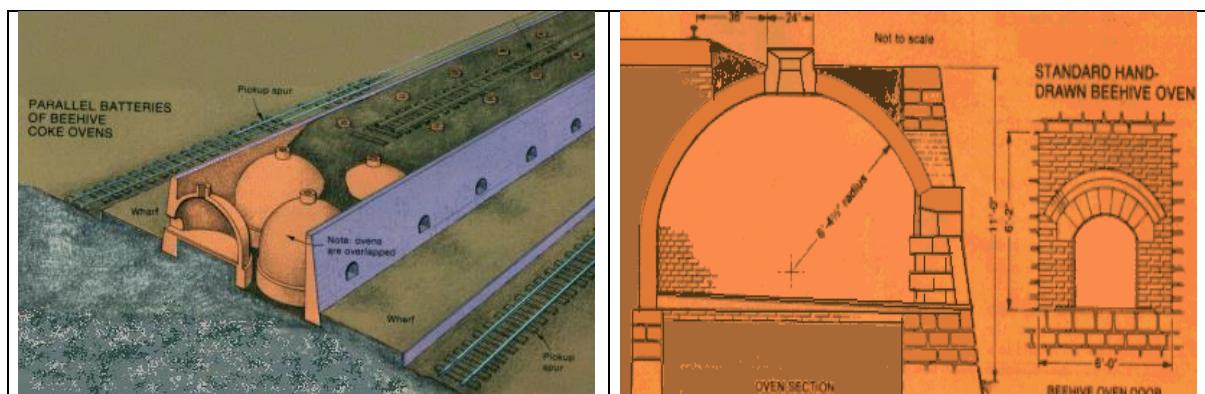
در کوره‌های مدرن کک سازی به صورت یک در میان سلولها و محفظه‌های احتراق قرار گرفته‌اند که گازهای حاصل از عملیات کک سازی پس از جمع آوری و بازیابی مواد مفید آن، برای احتراق در محفظه‌ها و گرم کردن سلولها استفاده می‌شوند.

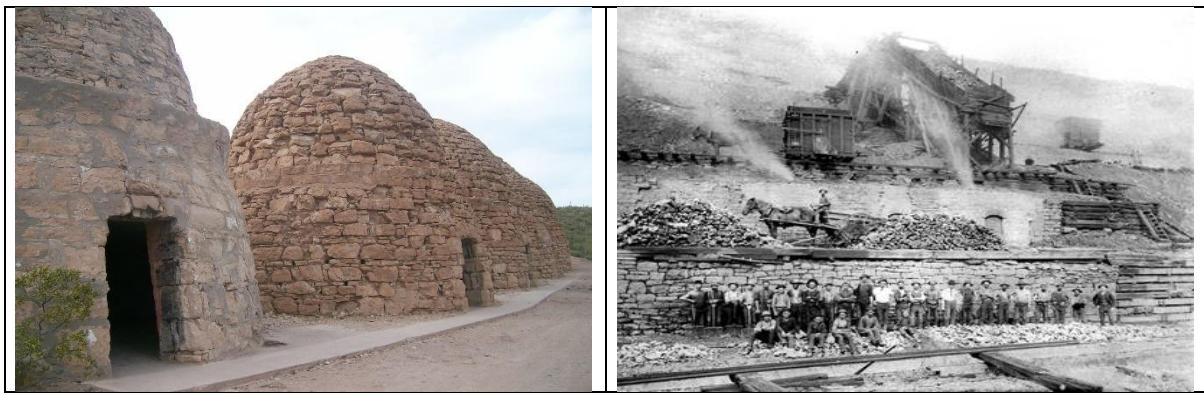
۱-۲-۱- کک سازی سنتی

کک سازی به روش سنتی توسط بخش خصوصی از سالیان قبل در ایران رایج بوده است. کک حاصل از این روش دارای مقاومت مکانیکی پائین و خاکستر نسبتاً بالا می‌باشد و در صنایع ریخته‌گری، قندسازی، لاستیک، فروآلیاژ و ... استفاده می‌شود. کوره‌های کک سازی سنتی دارای اشکال متنوعی بوده و دو روش کندوئی و مکعبی یا مزقلی نسبت به دیگر روش‌ها، رواج بیشتری یافته‌اند. در ذیل چند روش ککسازی سنتی به اجمال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲-۱- روش کندوئی

سلولهای ککسازی در این روش به شکل گنبدی بوده و معمولاً سلولها در کنار هم احداث شده و روی سلولها و فضای بین آنها به وسیله خاک پر می‌شود. از قسمت فوقانی سلولها، زغال سنگ در سلولها ریخته می‌شود. در قسمت تحتانی سلول که اصطلاحاً "مزقل" نامیده می‌شود، مقداری چوب جهت اشتعال ریخته می‌شود. سلولها دو جداره بوده و از فضای بین دیوارهای جهت خروج دود و مواد فرار استفاده می‌شود. ظرفیت هر سلول حدود ۵ تن زغال سنگ بوده و زمان شارژ ۴۸-۷۲ ساعت می‌باشد. راندمان سلولهای ککسازی، به کیفیت زغال سنگ بستگی داشته و ۵۰-۶۰ درصد می‌باشد. در این روش، کک حاصله با آب خاموش و سرد می‌شود. در **شکل ۱-۱**، نمایی از یک کوره کندوئی نشان داده شده است.





شکل ۱-۱- نمایی از یک کوره کندوئی ککسازی.

۲-۲-۱- روش مکعبی (مزقلی)

نوع دیگر ککسازی سنتی بنام ککسازی مکعبی یا مزقلی معروف است. در ساخت این سلولها، از آجرهای معمولی استفاده می‌شود. ظرفیت این سلولها ۱۵-۲۰ تن بوده و زمان پخت کک، با توجه به نوع زغالسنگ و شرایط پخت ۸-۱۲ روز طول می‌کشد. بازده کک در این سلولها ۵۰-۶۰ درصد است. در [شکل ۲-۱](#)، نمایی از یک کوره مکعبی (مزقلی) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱- نمایی از یک کوره مکعبی (مزقلی) ککسازی.

۳-۲-۱- کوره آپولت Appolt

باتوجه به سیستم کاری کوره‌های کندوئی و از بین رفتن مقداری کک در حین فرآیند ککسازی و لزوم خراب کردن دیوارهای حائل به منظور باردهی و بارگیری کوره، کوره کاملتری بنام آپولت طراحی شده است.

در این کوره، اتاق کک سازی از یک کوره قائم با ارتفاع ۴/۸ متر به قسمی ساخته شده است که قسمت فوقانی آن به طول $0 \times 1/15$ متر و قسمت تحتانی آن $0 \times 1/25$ متر می‌باشد. مجموعه فرها به صورت پیوسته و در ردیفهای ۱۲ یا ۱۵ عددی برابر یکدیگر بنا می‌شوند. در بالای هر فر یک دریچه بارگیری و در قسمت تحتانی آن دو درب آهنی که به طرف

پائین و خارج باز می‌گردد، قرار دارند. ظرفیت کوره آپولت کمتر از کوره کندوئی بوده و هر فر گنجایش ۱/۵ تن زغالسنگ خام را دارد. عمل ککسازی در این نوع کوره‌ها ۲۴ ساعت وقت لازم دارد. بازده کوره آپولت ۱۰ درصد از کوره کندوئی بیشتر و کک حاصله سخت و محکم و دارای خواص بسیار خوبی می‌باشد.



شکل ۱-۳- نمایی از یک کوره آپولت جهت ککسازی.

(Copee Oven) ۱-۲-۴- کوره کوپه

این نوع کوره ککسازی عیناً شبیه کوره آپولت می‌باشد و فقط در شکل ساختمانی و اندازه و ظرفیت فرها، با یکدیگر تفاوت دارند. اتاق با فری که در آن زغالسنگ محترق شده و به کک تبدیل می‌گردد دارای ۶۰ متر طول، ۰/۴۵ متر عرض و ارتفاع ۱۲ متر می‌باشد. زمان کک سازی در این روش ۲۴-۴۸ ساعت بوده و کک حاصل سخت و فشرده است.



شکل ۱-۴- نمایی از یک کوره کوپه جهت ککسازی.

۱-۲-۵- معايب کک سازی های سنتی

- آلودگی شدید هوای محیط زیست،

- از دست رفتن گازهای صنعتی و قطران،

- فضای وسیع مورد نیاز جهت احداث کوره‌ها،

- مصرف زیاد ایرانیت شکسته،

- تعداد زیاد پرسنل،

- پائین بودن مقاومت مکانیکی کک،

- آلوده شدن کک با خاک و کاه گل و بالا رفتن خاکستر کک،

- درصد بالای نرمه کک،

- مصرف زیاد آب،

۱-۳- کک سازی صنعتی

تولید کک در مقیاس صنعتی از حدود یک قرن پیش آغاز شده است. میزان تولید در کک سازی به روش صنعتی، به هیچ وجه قابل مقایسه با روش سنتی نبوده و نیاز به سرمایه‌گذاری بسیار زیاد دارد. به دلیل نیاز به سرمایه‌گذاری بسیار سنگین، این صنعت زمانی اقتصادی می‌باشد که ظرفیت تولید آن بسیار بالا باشد. در این روش با توجه به تصاعد میزان بسیار بالائی از گازهای حاصل از احتراق زغال سنگ، سعی می‌گردد که با بازیابی آنهای ارزش افزوده بیشتری تولید گردد.

در اکثر کارخانجات کک سازی صنعتی به روش شارژ از بالا^۱، سعی می‌گردد که از زغال‌سنگ‌های کک شو و نیمه کک شو استفاده شود و به ندرت از زغال‌سنگ نوع گازی استفاده می‌شود. در نتیجه از طیف وسیعی از انواع زغال‌سنگ‌های لاغر، گازی و گازی چرب، استفاده نمی‌شود. از آنجا که ذخیره زغال‌سنگ‌های چرب، چرب و کک شو در مقابل ذخیره زغال‌سنگ‌های گازی و لاغر، بسیار کم می‌باشد، تولید کک متالورژیکی از زغال‌سنگ‌های گازی و لاغر نیز مورد توجه قرار گرفته و روش‌های جدیدی ابداع شده است. یکی از روش‌های متدائل کک سازی به روش شارژ قالبی^۲ می‌باشد. این روش اولین بار در کشور آلمان در سطح صنعتی مورد استفاده قرار گرفته و به تولید انبوه رسید. در حال حاضر در کشورهای هند، فرانسه، چک، مجارستان، اوکراین و روسیه، از این روش نیز استفاده می‌شود.

¹ Top Charging

² Stamping

با توجه به تنوع ذخایر زغال سنگ در ایران و وجود حدود چند میلیارد تن زغال سنگ گازی و گازی چرب (با مواد فرار بالا) و همچنین چند میلیارد تن زغال کک شو لاغر تا آنتراسیت، تنها به روش شارژ از بالا، نمی‌توان کک مورد نیاز صنایع مختلف کشور را تامین نمود. با استفاده از روش‌های جدید شارژ قالبی، نصب کوره‌های پیش گرم کن و تنظیم مخلوط بهینه و دانه بندی مناسب، می‌توان شرایطی را فراهم نمود تا زغال سنگ‌های با مواد فرار بالا و زغال سنگ‌های کک شو لاغر نیز قابل استفاده در صنعت کک‌سازی گردند. هزینه سرمایه‌گذاری برای احداث یک واحد کک‌سازی به روش شارژ قالبی خیلی بیشتر از روش شارژ از بالا می‌باشد.

یکی از روش‌های متداول کک‌سازی صنعتی، استفاده از کوره‌های غیرقابل بازیابی (Non Recovery Ovens) می‌باشد. این کوره‌ها با ایده گرفتن از کوره‌های زمینی تولید زغال چوب طراحی و ساخته شده‌اند. امروزه واحدهای بسیار محدودی از این روش در مقیاس تجاری مشغول کار می‌باشند که مهمترین آنها عبارتند از:

- واحد کک‌سازی کمپانی Sun Coal

- واحد کک‌سازی کمپانی Kembla Coal & Coke

سرمایه‌گذاری این کوره‌ها پائین است و نیاز به تجهیزات خاصی ندارند.

۱-۴- مشخصات زغال سنگ مورد نیاز جهت کک‌سازی

مشخصات زغال سنگ مورد نیاز صنعت کک سازی به شرح زیر می‌باشد:

- رطوبت ۸-۹ درصد

- خاکستر کمتر یا مساوی ۱۱ درصد

- گوگرد کمتر یا مساوی $\frac{1}{3}$ درصد

- مواد فرار ۲۷-۲۸ درصد

- پلاستومتری ۱۴-۱۵ میلی متر

- دانه بندی

۰/۵ میلی متر

۰-۳ میلی متر 78 ± 2 درصد

- اسید سولفوریک ۲ درصد

۱ درصد	- بنزول خام
۰/۲ درصد	- آمونیاک ۱۰۰ درصد
۴/۷ کیلوگرم به ازای هر تن کک	- قطران

۱-۶- منابع تامین خوراک ککسازی در ایران

برای دستیابی به مخلوط مناسب زغال سنگ، می‌بایست زغال سنگ معادن مختلف به نسبت‌های خاصی با یکدیگر مخلوط گردند. منابع عمده تامین کننده زغال سنگ برای کارخانه ککسازی، عبارتند از:

- معادن زغال سنگ گلندروود
- معادن زغال سنگ گلیران
- معادن زغال سنگ طبس
- معادن زغال سنگ تخت
- دیگر معادن زغال سنگ و زغال سنگ خارجی (احتمالاً)

۱-۷- خدمات جنبی صنعت کک سازی

خدمات جنبی^۱ مورد نیاز صنعت ککسازی به شرح زیر می‌باشند:

- آب،
- برق،
- گاز طبیعی،
- هوای فشرده،
- بخار آب،

۱-۸- مکان‌یابی کارخانه ککسازی

در انتخاب مکان مناسب برای احداث کارخانه کک سازی، موارد زیر باید مورد نظر قرار گیرند:

- دسترسی سریع و راحت به منابع اولیه مانند زغال سنگ،
- دسترسی به شبکه حمل و نقل سراسری کشور (راه آهن - جاده آسفالت)،

¹ Utility

- دسترسی به شبکه برق و گاز،

- نیروی انسانی،

- شرایط آب و هوايی،

- محدودیت‌های زیست محیطی،

- بازار مصرف،

۹-۱- تولید کک در ایران

۱-۹-۱- تولید کک صنعتی

در حال حاضر تنها واحد تولید کک متالورژیکی در ایران، واحد ککسازی کارخانه ذوب آهن اصفهان می‌باشد که دارای دو باطری ککسازی به ظرفیت حدود ۱۳۵ تن در سال می‌باشد. با توجه به برنامه طرح توسعه ذوب آهن اصفهان با هدف افزایش تولید چدن مذاب از ۲ میلیون تن به ۳/۶ میلیون تن در سال، طرح توسعه واحد ککسازی نیز در دست اجرا می‌باشد. با توجه به این طرح، ظرفیت تولید کک به حدود ۲ میلیون تن در سال خواهد رسید. در حال حاضر مقدمات احداث یک واحد ککسازی به ظرفیت ۳۰ هزار تن در سال در شهرستان زرند کرمان نیز فراهم شده و با شرکت چینی CITIC، قراردادی در زمینه طراحی و احداث کارخانه، منعقد شده است. ظرفیت این کارخانه تا ۴۰۰ هزار تن در سال قابل توسعه می‌باشد.

۱-۹-۲- تولید کک سنتی

کوره‌های ککسازی سنتی که توسط بخش خصوصی احداث شده‌اند، در مقیاس تولید حدود چند ده هزار تن در سال در نقاط مختلف ایران، در حال کار بوده و با استفاده از انواع زغالسنگ‌های کک شو، نیمه کک شو و گازی چرب تا کک شو لاغر، به تولید کک اقدام می‌نمایند.

کوره‌های ککسازی سنتی عمدتاً در اطراف معادن زغالسنگ خصوصی احداث شده‌اند. مهمترین کارگاه‌های ککسازی سنتی در الیکا، آبیک، اسکنان، دامغان، قشلاق و خطب مراغه در حالت کار می‌باشند. ظرفیت تولید این کارگاه‌ها، سالیانه ۵۰-۶۰ هزار تن کک می‌باشد که عمدتاً در کارخانجات قندسازی، لاستیک،... مصرف می‌شوند.

۱۰- بازار مصرف کک در ایران

کارخانه ذوب آهن در حال حاضر با تولید حدود ۲/۲ میلیون تن چدن مذاب به ۱/۶۵۰/۰۰۰ تن کک متالورژیکی نیاز دارد. با احتساب نسبت کک متالورژیکی به کل کک تولیدی برابر ۸۵ درصد، میزان کک قابل استفاده در کوره بلند (کک اسکیپ) بر اساس تولید ۱/۰۸۲/۰۰۰ تن کک در سال ۷۹، برابر خواهد بود با:

$$1/082/000 \times 0/85 = 919/700$$

تن کک اسکیپ

و در نتیجه در حال حاضر، ذوب آهن اصفهان، با کمبود کک معادل ۱۴۰-۱۳۰ هزار تن در سال مواجه می باشد. با اجرای طرح توسعه و افزایش تولید چدن مذاب به ۳/۶ میلیون تن در سال، سالیانه به ۱۸۲۷۰۰۰ تن کک اسکیپ و یا حدود ۲۰۳۳ میلیون تن کک متالورژیکی نیاز می باشد که با تولید ۹۰۰۰۰۰ تن کک از کارگاه در دست احداث ککسازی، جمع تولید سالیانه کک برابر ۱/۹۸ میلیون تن می باشد که حدوداً سالیانه ۵۰-۷۰ هزار تن کمبود کک وجود خواهد داشت.

کارخانه های در دست احداث ذوب آهن کردستان با ظرفیت تولید سالیانه ۷۰۰۰۰ تن چدن مذاب و قابل توسعه تا ۲۱۰ هزار تن در سال، ذوب آهن همدان با ظرفیت سالیانه ۷۰۰۰۰ تن چدن مذاب و کارخانه ذوب آهن میبد با ظرفیت سالیانه ۳۰۰ هزار تن چدن مذاب در سال، از مصرف کننده های بالقوه کک متالورژیکی می باشند که به نظر می رسد سالیانه ۲۲۰ هزار تن کک متالورژیکی (بدون احتساب طرح توسعه ذوب آهن کردستان) نیاز داشته باشند. صنایع فروآلیاژ از قبیل فروسیلیس سمنان، فروسیلیس ازنا، فرومگنتز آبادان، همچنین فولاد مبارکه و فولاد خوزستان و ... پیش بینی می شود که سالیانه به ۱۰۰ هزار تن کک متالورژیکی نیاز داشته باشند.

صنایع ریخته گری، لاستیک، باطری سازی، قندسازی و ... جزء مصرف کنندگان سنتی کک می باشند که در حال حاضر، کک مورد نیاز خود را عمده از کوره های کک سازی سنتی تامین می نمایند. بخشی از صنایع نیز کک مورد نیاز خود را از بازارهای خارجی تامین می نمایند. مصرف سالیانه این بخش حدود ۵۰ هزار تن برآورد می گردد.

در مجموع با توجه به مصارف کک اعم از مصارف فعلی و مصارف آتی، پیش بینی می شود که مصارف داخلی کک سالیانه به ۲/۵-۲/۶ میلیون تن انواع کک برسد. در نتیجه با توجه به ظرفیت های ککسازی در حال بهره برداری و در دست ساخت، در سالهای آتی، سالیانه ۳۰۰-۲۰۰ هزار تن کمبود انواع کک وجود داشته باشد.

طرحهای نیز بعضًا توسط بخش خصوصی و دولتی نیز جهت ککسازی در دست مطالعه می باشد که از ظرفیت در نظر گرفته شده و نوع کک تولیدی، اطلاعی در دست نمی باشد.

۱-۱۱-آشنایی با فرآیند ککسازی

کک ماده‌ای است متخلخل که در کوره بلند و صنایع متالورژیکی به کار می‌رود و نقش‌های مختلف تأمین انرژی، احیاء کانی‌های آهن، ایجاد تخلخل برای عبور گازهای احیاء کننده و کربوره کردن چدن را دارا می‌باشد و در کوره کوپل نیز، کک بعنوان سوخت و عامل احیاء کننده مصرف می‌شود.

برای احیای آهن به عاملی نیاز است که اکسیژن را از اکسیدهای آهن جدا کند، این ماده را عامل احیاء می‌نامند تمام واکنشهای کوره بلند در درجه حرارت‌های زیاد که نتیجه سوختن کک است انجام می‌شود. برای عمل احیاء و ذوب در کوره بلند از کک بدست آمده از زغال‌سنگ استفاده می‌شود. از گاز طبیعی و مازوت نیز به مقدار کم بجای کک استفاده می‌کنند. قابلیت احیاء کنندگی هیدروژن گاز طبیعی خیلی بیشتر از کربن کک است. بنابراین سعی می‌شود از تزریق گاز طبیعی در کوره بلند نیز استفاده شود تا بوسیله سوختن آن گاز هیدروژن در کوره بلند تولید شود. در کوره‌های مدرن امروزی از روش تزریق پودر زغال نیز استفاده می‌شود، که این امر مصرف کک را بشدت کاهش می‌دهد.

چون زغال‌سنگ دارای استحکام کم و ناخالصی بالا (تقریباً ۳۵٪) است، نمی‌تواند کلیه شرایط لازم را بعنوان سوخت کوره بلند داشته باشد، لذا به کک تبدیل می‌شود تا شرایط لازم (استحکام کافی، درصد پایین ناخالصیها و ارزش حرارتی بالا) برای شارژ در کوره بلند را پیدا کند. بنابراین تغییراتی که از تبدیل زغال‌سنگ به کک حاصل می‌شود عبارتند از:

۱- افزایش درصد کربن و در نتیجه افزایش ارزش حرارتی.

۲- بالا رفتن مقاومت در مقابل عوامل مکانیکی از قبیل ضربه - فشار - سقوط و سایش.

۳- کاهش ناخالصی‌های فرار که در اثر متصاعد شدن گازها و مواد فرار زغال‌سنگ حاصل می‌شود.

۴- افزایش سطح مفید برای سوختن بیشتر که با متخلخل شدن کک تأمین می‌شود.

کک علاوه بر تأمین انرژی حرارتی لازم در کوره بلند عمل احیاء اکسیدهای آهن موجود در سنگ آهن را نیز انجام می‌دهد.

احیاء می‌تواند مستقیماً توسط کربن و یا توسط گاز CO و H_2 انجام شود.

ارزش حرارتی کک باید حداقل و رطوبت آن حداقل باشد (مقدار رطوبت کک بستگی به مدت زمان توقف در برجه‌ای خاموش کننده و نیز مقدار جذب آب در کک دارد) اگر مقدار رطوبت کک زیاد باشد اثر منفی روی کار کوره بلند دارد، زیرا از بوجود آمدن یک وضعیت مناسب حرارتی در کوره بلند جلوگیری می‌کند و راندمان کوره پایین می‌آید.

در حال حاضر در ذوب آهن اصفهان برای خاموش کردن کک از روش‌تر یا پاشیدن آب سرد روی کک‌های داغ استفاده می‌شود و از روش خشک (خاموش کردن بوسیله گاز بی اثر یعنی ازت) استفاده نمی‌شود با استفاده از روش خشک می‌توان از مقدار رطوبت کک کم نمود و استحکام آنرا افزایش داد. و البته از انرژی گرمایی گاز دمیده شده به کک نیز استفاده کرد.

با توجه به موارد ذکر شده شرایط لازم برای کک مصرفی کوره بلند عبارتند از:

- ارزش حرارتی آن نباید کمتر از ۴۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم باشد.

- درصد گوگرد آن نباید بیش از ۱٪ باشد.

- کک باید دارای استحکام کافی باشد.

- درصد خاکستر آن نباید از ۱۴٪ بیشتر باشد.

- مقدار رطوبت موجود در کک بایستی کمتر از ۹٪ باشد و اندازه دانه‌های کک باید ۵ تا ۸۰ میلیمتر باشد. معمولاً برای

ذوب یک تن آهن خام ۴۵۰ کیلوگرم کک لازم است که قیمت این مقدار کک ۳۰-۵۰ درصد قیمت یک تن آهن خام است.

- مواد فرار کمتر از ۱٪ باشد.

معدن زغالسنگ ایران عبارتند از:

۱) شرکت زغالسنگ کرمان که شامل منطقه پابدانا در فاصله ۱۴۲ کیلومتری کرمان و منطقه باب نیزو در فاصله ۷۳ کیلومتری شمال غرب کرمان و منطقه اکتشافی دره گز بفاصله ۱۳۰ کیلومتری شمال غرب کرمان و منطقه هجدک است.

۲) شرکت زغالسنگ البرز مرکزی (زیر آب) که در حال حاضر این شرکت از معدن کارمزد بهره‌برداری می‌نماید و در حال حاضر در منطقه آلاشت تصمیم دارند که از معدن کارسنگ برای تولید هر چه بیشتر زغالسنگ جهت کارخانه ذوب آهن اصفهان بهره‌برداری نمایند.

۳) شرکت زغالسنگ البرز شرقی (شاہرود) که در آن معدن مهدویه بفاصله ۷۵ کیلومتری شاهروod قرار گرفته و معدن طزره است که از شاهروod ۴۵ کیلومتر فاصله دارد.

۴) شرکت زغالسنگ البرز غربی (سنگرود) این معدن یکی از معدن‌های کننده زغالسنگ کارخانه ذوب آهن اصفهان است. این واحد معدنی در ۳۲ کیلومتر شمال شرقی لوشان قرار گرفته است و زغال سنگ آن نامرغوب و از لحاظ کک شوندگی از انواع ضعیف است. میزان تولید این معدن ۲۰-۱۰ هزار تن در سال و بیشتر مناسب مصارف سوختی است.

۵) معدن زغال سنگ طبس.

۱-۱۲- بررسی فنی و تکنولوژی ککسازی

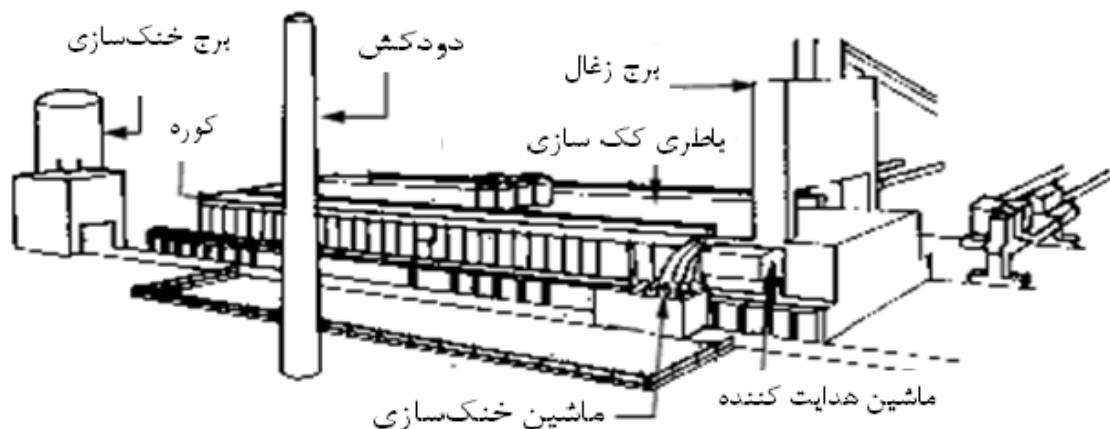
کک متالورژیکی یکی از ملزومات فرآیند تولید آهن در کوره بلند می‌باشد. زغالسنگ با استحکام، خلوص کم و ناخالصی بالا (تقریباً ۳۵٪) قابلیت استفاده در کوره بلند را ندارد. زغالسنگ طی فرآیند پیروولیز به کک تبدیل می‌شود تا شرایط لازم (استحکام کافی، درصد پایین ناخالصی‌ها و ارزش حرارتی بالا) برای شارژ در کوره بلند را پیدا کند. فرآیند حرارت دهی زغالسنگ در غیاب اکسیژن، تولید گازها، مایعات و مواد جامد را پیروولیز زغال می‌نماید. پیروولیز زغال در دمای زیاد، کربنیزاسیون نامیده می‌شود.

کک ماده‌ای متحلل و کربن‌دار است که از حرارت دهی به زغالسنگ در غیاب اکسیژن حاصل می‌شود. کک انواع مختلفی دارد، یک نمونه از کک متالورژیکی در [شکل ۱-۵](#) نشان داده شده است.



شکل ۱-۵- تصویری از یک نمونه کک متالورژیکی.

فرآیند حرارت دهی در سلول‌های ککسازی انجام می‌شود. مجموعه‌ای از سلول‌های ککسازی در کنار یکدیگر را باطری ککسازی می‌نامند. نمایی از یک باطری ککسازی و نحوه قرارگیری اجزای مختلف آن، در [شکل ۱-۶](#) نشان داده شده است.



شکل ۱-۶- یک باطری ککسازی و ماشین‌آلات همراه.

در فرآیند حرارت دهی، مواد فرار موجود در زغال سنگ، تقطیر شده و زغال در حالت نیمه مذاب قرار می‌گیرد. ماده حاصله پس از خنک شدن، کک (کک متالورژیکی) نامیده می‌شود. حدود ۷۰٪ فولاد جهان از طریق کوره بلند تولید می‌شود. کک در کوره بلند نقش‌های مختلفی از جمله تأمین انرژی، احیاء کانه‌های آهن، ایجاد تخلخل برای عبور گازهای احیاء کننده و کربوره کردن چدن را به عهده دارد. زغال‌های خاصی جهت تولید کک متالورژی بکار می‌روند. خواص زغال سنگ اولیه تعیین کننده خواص کک تولیدی است. مواد غیرآلی زغال سنگ به صورت خاکستر در کک باقی می‌ماند و بر عملکرد باطری ککسازی و در نهایت بر کیفیت آهن تولید شده در کوره بلند اثرات منفی می‌گذارد. میزان خاکستر بهینه کک متالورژیکی در حدود ۱۲ تا ۱۲/۵ درصد و ابعاد بهینه کک ۳۰ تا ۹۰ میلی‌متر می‌باشد. گوگرد و فسفر جزء عناصر مضر در فولاد به حساب می‌آیند. کک دارای درصد قابل توجه‌ای از گوگرد و فسفر است. لذا کک را مهم‌ترین عامل ورود گوگرد و فسفر به فولاد، می‌توان دانست. با توجه به موارد ذکر شده شرایط لازم برای کک مصرفی کوره بلند عبارتند از:

- ارزش حرارتی کک، بیشتر از ۴۰۰۰ کیلوکالری بر کیلوگرم،

- مقدار گوگرد موجود در کک، کمتر از ۱٪،

- کک دارای استحکام کافی باشد،

- مقدار خاکستر کک کمتر از ۱۴٪،

- مقدار رطوبت موجود در کک کمتر از ۹٪،

- اندازه دانه‌های کک بین ۵ تا ۸۰ میلی‌متر،

- مواد فرار کمتر از ۱٪،

معمولأً برای ذوب یک تن آهن خام ۵۰۰-۴۵۰ کیلوگرم کک لازم است که قیمت این مقدار کک، معادل ۳۰-۵۰٪ قیمت

یک تن آهن خام است. به غیر از کک متالورژیکی تولید شده، دو نوع دیگر کک نیز تولید می‌شود:

- کک ریخته‌گری^۱: خاکستر در حدود ۱۰ درصد و ابعاد ۸۰ تا ۲۲۰ میلی‌متر،

- کک نرمه^۲: خاکستر در حدود ۱۲/۵ تا ۱۲ درصد و ابعاد ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر،

کک ریخته‌گری در کوره‌های ریخته‌گری نوع کوپلی یا به ابعاد کوچک‌تر خرد شده و به عنوان کک متالورژیکی استفاده می‌شود. همچنین کک نرمه برای صرفه‌جویی در مصرف کک و افزایش راندمان کوره بلند، به داخل کوره تزریق می‌شود. میزان مصرف کک نرمه در کوره بلند بسیار متغیر است و از ۱۰۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم بر تن محصول استفاده می‌شود. یافته‌های تحقیقاتی

^۱: Foundry Coke

^۲: Nut coke

اثبات نموده که افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی کک نرمه، باعث افزایش ۱/۵ تا ۲/۵ درصدی تولید چدن در کوره بلند خواهد شد.

۱۳-۱- مشخصات فنی کک تولیدی

مشخصات کک متالورژیکی، تأثیر قابل توجهی بر راندمان کوره بلند دارد. خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مورد نیاز برای کک متالورژیکی در ادامه توضیح داده شده است.

۱-۱۳-۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی کک

۱-۱۳-۱-۱- خاکستر کک

میزان خاکستر در کک کیفیت کک را تغییر داده لذا به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر راندمان کوره بلند شناخته می‌شود. وجود خاکستر در کک سبب افزایش مصرف کک و سنگ آهک در کوره بلند و کاهش ظرفیت تولید باطری‌های ککسازی می‌شود. به طوری که افزایش ۱ درصدی مقدار خاکستر در کک، موجب کاهش حداقل ۲/۵ درصدی بازدهی کوره بلند می‌شود. ترکیب شیمیایی خاکستر کک عموماً شامل سیلیس و آلومینا به مقدار ۷۰ تا ۸۰ درصد و ترکیبات جزئی مانند اکسید آهن دو ظرفیتی، اکسید منیزیم و اکسید کلسیم می‌باشد. میزان خاکستر کک به میزان خاکستر زغال سنگی که کک از آن تهیه شده است، بستگی دارد. به طور معمول از هر یک تن زغال سنگ، ۰/۷ تن کک تولید می‌شود. با توجه به ثابت بودن تغییر میزان خاکستر زغال سنگ در فرآیند ککسازی، خاکستر کک در حدود ۱/۴ برابر خاکستر زغال سنگ خواهد بود. خاکستر زغال سنگ مصرفی برای ککسازی در حدود ۸ تا ۱۰ درصد است. بنابراین، خاکستر کک متالورژیکی حاصله ۱۱/۲ تا ۱۴ درصد خواهد بود.

دماهی ذوب خاکستر کک^۱ نیز از عوامل تعیین کننده کیفیت کک محسوب می‌شود. دماهی ذوب خاکستر کک عمدتاً متأثر از مقدار سیلیس موجود در آن است. هرچه مقدار سیلیس کک بیشتر باشد، دماهی ذوب خاکستر کک نیز بیشتر خواهد بود. خاکستر کک به سه دسته تقسیم می‌شود:

خاکستر زود گداز: دماهی ذوب کمتر از ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد،

خاکستر با قابلیت ذوب متوسط: دماهی ذوب در محدوده ۱۲۰۰ تا ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد،

خاکستر دیرگداز: دماهی ذوب بیشتر از ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد،

^۱ Melting point of coke ash

افزایش درصد خاکستر در کک متالورژیکی موجب افزایش هزینه‌های عملیاتی، کاهش راندمان و افزایش مصرف کک در کوره بلند می‌شود. اگر حد ماکزیمم خاکستر کک معادل ۱۴ درصد فرض شود، افزایش هر ۱ درصد خاکستر کک، موجب افزایش ۴۵ درصدی مصرف کک و کاهش ۳ الی ۶ درصدی راندمان کوره بلند می‌شود.

۱-۱-۲- رطوبت کک

رطوبت موجود در کک یکی دیگر از عوامل تعیین کننده کیفیت کک است. به طور معمول میزان رطوبت کلی^۱ کک نباید بیشتر از ۵ درصد باشد (در بیشتر مراجع ۹ درصد می‌باشد). اگر میزان رطوبت کک بیشتر از میزان یاد شده باشد، مرغوبیت کک کاهش خواهد یافت. رطوبت مازاد موجب هدر رفتن بخشی از انرژی حرارتی کوره بلند جهت تبخیر آب موجود در کک می‌شود. لازم به ذکر است که میزان رطوبت موجود در کک، با میزان تخلخل کک ارتباط مستقیم دارد و هرچه میزان تخلخل کک بیشتر و ابعاد آن کمتر باشد، رطوبت کک نیز بیشتر خواهد شد.

۱-۱-۳- وزن مخصوص کک

وزن مخصوص حقیقی زغالسنگ‌های مورد استفاده در فرآیند ککسازی در محدوده ۱/۱ تا ۱/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب بوده و بستگی به میزان مواد فرار در ترکیب زغالسنگ دارد. در فرآیند تبدیل زغالسنگ به کک و با خروج مواد فرار از ساختار زغالسنگ، وزن مخصوص حقیقی کک افزایش یافته و به حدود ۱/۸ تا ۲ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌رسد. اما به دلیل تخلخل زیاد کک، وزن مخصوص ظاهری کک در حدود ۰/۸ تا ۰/۹ گرم بر سانتیمتر مکعب برآورد می‌شود. وزن مخصوص ظاهری کک، بستگی به دانه‌بندی و توزیع ابعادی کک دارد. به طوری که با کوچکتر شدن ابعاد کک، وزن مخصوص ظاهری آن کاهش می‌یابد. البته این امر همیشه صادق نیست و چنانچه ابعاد کک از حد مشخصی کوچکتر باشد، وزن مخصوص ظاهری کک افزایش خواهد یافت.

۱-۱-۴- تخلخل کک

نسبت حجم فضای خالی بر چگالی ظاهری کک، نشان دهنده تخلخل کک بوده و به صورت درصد بیان می‌شود. درصد تخلخل معمول در کک متالورژیکی از ۳۵ الی ۵۵ درصد متغیر است. بطور کلی با افزایش میزان تخلخل در کک، موجب افزایش واکنش‌پذیری کک می‌شود.

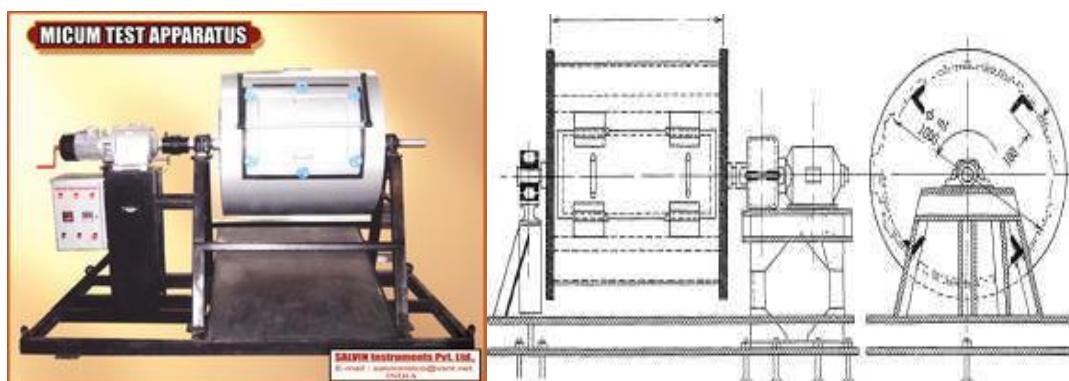
^۱ Total Moisture

۱-۱۳-۵- مقاومت فشاری کک

با توجه به اینکه کک متالورژیکی در کوره بلند و تحت فشار وزنی بار ورودی قرار دارد، میزان مقاومت فشاری کک متالورژیکی اهمیت پیدا می‌کند. خرد یا نرم شدن کک متالورژیکی تأثیر نامطلوبی در کارکرد کوره و توزیع گازهای صعودی خواهد گذاشت. مقاومت فشاری کک از ۹۰ تا ۱۸۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع متغیر است.

۱-۱۳-۶- مقاومت به فرسایش و ضربه در کک

مقاومت فرسایشی، تعیین کننده کیفیت کک در هنگام بارگیری و همچنین حمل و نقل می‌باشد. اندیس مایکوم^۱ نشان دهنده مقاومت کک در برابر ضربه و سایش است. این اندیس توسط انجام آزمایش با استوانه مایکوم تعیین می‌شود. استوانه مایکوم، استوانه‌ای از جنس فولاد و به قطر داخلی یک متر است. برای محاسبه اندیس مایکوم، مقدار ۵۰ کیلوگرم نمونه کک با ابعاد درشت‌تر از ۶۳ میلی‌متر، به مدت ۴ دقیقه و سرعت دوران ۲۵ دور بر دقیقه در استوانه مایکوم خرد می‌شود. در ادامه مواد خرد شده توسط سرندهایی با دهانه ۱۰ و ۴۰ میلی‌متری طبقه بندی می‌شوند. شاخص M40 (درصدی از مواد باقیمانده بر روی سرند ۴۰ میلی‌متری)، نشان دهنده مقاومت کک در برابر ضربه و M10 (درصد مواد عبوری از سرند ۱۰ میلی‌متری) نشان دهنده مقاومت کک در برابر سایش است. مقدار معمول M40، حداقل ۷۸ درصد و M10، حداقل ۹ درصد است. نمایی از درام مایکوم مورد استفاده جهت اندازه‌گیری اندیس مایکوم در شکل ۷-۱ آورده شده است.



شکل ۷-۱- نمایی از درام مایکوم.

^۱ Micum

۱-۱۳-۲- خواص شیمیایی کک

خواص شیمیایی کک از طریق آنالیز ترکیب شیمیایی، خاکستر، گوگرد و غیره تعیین می‌شود.

۱-۱۳-۲-۱- ترکیب شیمیایی کک

ترکیب شیمیایی عمومی کک در **جدول ۱-۱** درج شده است. مشخصات استاندارد کک متالورژیکی در بازارهای جهانی

نیز در **جدول ۲-۱** درج شده است.

جدول ۱-۱- ترکیب شیمیایی عمومی کک.

درصد	مواد تشکیل دهنده
۸۵ تا ۸۰	کربن
۲ تا ۱	مواد فرار
۳ تا ۱	رطوبت
۱۲ تا ۸	خاکستر
۱/۵ تا ۰/۵	گوگرد
۱۰۰	جمع

جدول ۱-۲- کک متالورژیکی استاندارد.

درصد	مشخصه
(max)۱۰-۱۴	خاکستر
(max)۰/۶	گوگرد
(max)۱/۰	مواد فرار
(max)۵/۰	رطوبت
۰/۰۴	فسفر
(max)۱۵	۲۵ mm زیر ابعاد
(min)۸۶	M40
(max)۷	M10
(min)۶۸	CSR
(max)۲۵	CRI

۱-۱۳-۲-۲- میزان کربن

کربن جزء اصلی سازنده کک بوده و به دو شکل بلورین (گرافیتی) و غیربلورین در ساختار کک یافت می‌شود. قسمت عمدۀ

کربن موجود در ساختار کک به صورت غیربلورین می‌باشد. در واقع میزان کربن بلورین (گرافیتی) موجود در کک به حرارت

تشکیل آن بستگی دارد. هرچه حرارت اعمال شده به کک در فرآیند تشکیل بیشتر باشد، میزان کربن بلورین (گرافیتی) بیشتر خواهد بود. اکتیویته کربن بلورین کمتر از اکتیویته کربن بی شکل است و بنابراین کارایی کمتری در کوره بلند خواهد داشت.

۱-۱۳-۲-۳- مواد فرار

اگر کک تا ۸۵ درجه سانتی گراد و یا بیشتر حرارت داده شود، مواد فرار آن خارج می شود. خارج شدن مواد فرار در حرارتدهی ثانویه به علت شکسته شدن هیدروکربن های موجود در کک است. هر چه جریان حرارت دادن در کوره کتسازی یکنواخت تر و درجه حرارت کک قبل از لحظه خروج کک از باطری کتسازی بیشتر باشد، درصد مواد فرار در آن کمتر خواهد بود. کک متالورژیکی (کک قابل استفاده در کوره بلند) معمولاً دارای ۰/۹٪ تا ۱/۱٪ مواد فرار است. وجود مواد فرار در کک نامطلوب است. زیرا مواد فرار باعث ترک برداشتن و شکستگی کک در کوره بلند شده و از مقاومت مکانیکی آن می کاهد.

۱-۱۳-۴-۲-۴- میزان و نوع گوگرد

گوگرد مهم ترین عنصر نامطلوب در کک است. منشأ گوگرد موجود در کک، زغال سنگ است. بنابراین انتخاب نوع زغال سنگ اولیه در کتسازی، عامل مهمی بر کیفیت نهایی کک است. سه منبع عامل ورود گوگرد در زغال سنگ شناخته می شود:

- گوگرد موجود در کانی های سولفیدی آهن (مانند پیریت FeS_2): این نوع گوگرد را می توان تا حدود زیادی با روش های فرآوری زغال سنگ، حذف کرد.

- گوگرد به شکل سولفات (مانند گچ CaSO_4): این نوع گوگرد به روش های فرآوری مواد معدنی تا حدودی قابل حذف کردن است.

- گوگرد به شکل مواد آلی (مانند حلقه های آلی تیوفن): این نوع گوگرد با روش های فرآوری زغال سنگ قابل حذف کردن نیست.

گوگرد علاوه بر اثر منفی بر کیفیت کک، اثرات منفی زیست محیطی نیز دارد. گوگرد موجود در کک در کوره بلند اکسید شده و موجب انتشار گازهای مضر SO_x در اتمسفر و آلایندگی زیست محیطی می شود. همچنین وجود گوگرد در ترکیب کک، موجب خوردگی تجهیزات می شود.

۱-۱۳-۵-۲-۵- واکنش پذیری کک

واکنش پذیری عبارتی است که برای توصیف قابلیت ترکیب گاز دی اکسید کربن و کربن و تشکیل گاز منواکسید کربن به کار می رود. منواکسید کربن (CO) عامل اصلی احیا کننده آهن در کوره بلند است. قابلیت تولید منواکسید کربن و به تبع آن، واکنش پذیری کک از مهم ترین عوامل تعیین کننده کیفیت کک است. واکنش پذیری کک متالورژیکی، با اندیس واکنش پذیری

کک (CRI)^۱ تعیین می‌شود. این اندیس با اندازه‌گیری درصد وزنی کاسته شده از نمونه کک، پس از واکنش با گاز دی‌اکسید کربن تعیین می‌شود. همچنین اندیس مقاومت کک پس از واکنش (CSR)^۲ نشان‌دهنده مقاومت کک متالورژیکی پس از واکنش آن با گاز دی‌اکسید کربن است. بر اساس استاندارد ASTM D 5341 روش تعیین CRI و CSR به شرح زیر است.

مقدار ۲۰۰ گرم نمونه کک خشک در ابعاد ۱۹ تا ۲۲ میلی‌متر در مجاورت گاز دی‌اکسید کربن با نرخ جريان ۵ لیتر بر دقیقه، به مدت ۲ ساعت و در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. نمونه واکنش داده پس از خنک شدن، توزین شده و CRI بر اساس درصد وزنی کاسته شده از نمونه اولیه بیان می‌شود. سپس نمونه واکنش داده در آسیا (درام نوع A) قرار داده شده و به مدت ۳۰ دقیقه و به تعداد ۶۰۰ دور خرد می‌شوند. اندیس CSR بر اساس درصد تجمعی قطعاتی با ابعاد بزرگ‌تر از ۱۰ میلی‌متر تعیین می‌شود. بنابراین CRI و CSR رابطه عکس با یکدیگر دارند. مقادیر استاندارد CRI و CSR به منظور تأیید کیفیت کک به ترتیب، حداقل ۲۵ درصد و حداقل ۶۸ درصد است.

۱-۱۳-۳- محصولات جانبی

۱-۱۳-۳-۱- قطران

قطران مایع متراکمی است که از تقطیر مواد کربن‌دار بدست می‌آید. این ماده در دمای معمولی به شکل مایعی سیاه رنگ، غلیظ و با بوی تند می‌باشد. وزن مخصوص قطران ۱/۲۲ تا ۱/۴۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و ویسکوزیته آن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌پواز است. قطران زغال‌سنگ کاربردهای مختلفی مانند سوخت بویلهای، پرکننده در صنایع جاده‌سازی (جاده‌سازی به روش تارماک) و در صنایع گرافیتسازی دارد. همچنین مواد شیمیایی همچون قیر، روغن آنتراسین، روغن شستشو^۳، نفتالین، روغن‌های کربولیک (فنول) و روغن‌های سبک از پالایش قطران بدست می‌آید.



شکل ۱-۸- قطران تولیدی از فرایند کک‌سازی.

¹ Coke Reactivity Index

² Coke Strength after Reaction

³ Wash oil

۱-۳-۲- بنزول خام

بنزول خام مخلوطی از هیدروکربن‌های بنزنی است. به طور کلی در بنزول خام ترکیبات پارافینی، نفتی، فنلی، گوگردی و مانند آنها وجود دارد. بنزول خام در صنعت کاربرد چندانی ندارد اما پس از تصفیه و پالایش موادی از آن استحصال می‌شود که در صنایع مختلف کاربرد دارد.

مهم‌ترین مواد حاصل از تصفیه بنزول عبارتند از: بنزن، تولوئن، نایلن و هیدروکربن‌های غیراشباع دیگر. مقدار هیدروکربن‌های بنزنی (بنزن و مشتقات آن) در بنزول خام در حدود ۸۰ تا ۹۵٪ است. مقدار بنزن در این مخلوط به ۷۵٪ می‌رسد. بنزن در صنعت کاربرد قابل توجهی دارد و از آن ترکیبات مشتق شده با کاربرد در تهیه اجسام پلاستیکی، کائوچو و الیاف مصنوعی (نایلون و کاپرون) و فرآوردهای مهم دیگر اشاره نمود.

بنزول خام همچنین در پزشکی و صنایع دیگر کاربرد دارد. درصد خلوص و سایر مشخصات بنزن و تولوئن و غیره تابع استانداردهایی است که کارخانه‌های ککسازی باید این ترکیبات را متناسب با استانداردهای تعیین شده صادر نمایند. روش‌های مختلفی برای تصفیه بنزول خام وجود دارد و یکی از بهترین روش‌ها، تقسیم بنزول خام اولیه به دو دسته بنزول سبک (اصلی) و بنزول سنگین می‌باشد. در این روش برای جدا کردن ترکیبات گوگردی و هیدروکربنی غیراشباع از اسید سولفوریک استفاده می‌شود. در روش مذکور بنزول سبک (اصلی) جدا شده و در مرحله بعد از مخلوط تولوئن و نایلن، حلال، بنزول سنگین و حلال‌های نفتی به دست می‌آید.

۱-۳-۳- آمونیاک

آمونیاک در فرآیند ککسازی، از ترکیب هیدروژن و ازت موجود در زغال‌سنگ به دست می‌آید. حدود ۱۵ درصد نیتروژن موجود در زغال‌سنگ‌ها، به صورت آمونیاک خارج می‌شود. پنج درصد آن در کک باقی می‌ماند و حدود پنج درصد آن به سیانید هیدروژن و بقیه به صورت گازهای دیگر خارج می‌شوند. برای تهیه و جدا کردن آمونیاک، گاز کک را پس از تمیز کردن به واحد تولید اسید سولفوریک که یکی از قسمت‌های کارخانه‌های ککسازی است، فرستاده و آن را به سولفات آمونیم متبلور شده تبدیل و استخراج می‌کنند. آمونیاک عاملی مزاحم در جدایش بنزول‌ها است. عمل جدایش آمونیاک، قبل از جدایش بنزول انجام می‌شود. از طرفی وجود همزمان HCN و H_2S در گاز، موجب تولید فرو- فری سیانور آمونیم می‌شود که مضر است. مقدار آمونیاک در گاز ارسالی به مرحله جدایش بنزول، بایستی کمتر از ۵ گرم بر متر مکعب گاز باشد.

آمونیاک کاربردهای متعددی در صنایع گوناگون دارد. گاز آمونیاک در ساختن اسید نیتریک مصرف می‌شود. آمونیاک مایع به شکل ماده‌ای سرد کننده به کار می‌رود. سولفات آمونیوم، نیترات آمونیوم و فسفات آمونیوم را می‌توان از آمونیاک به دست

آورد و به صورت کود شیمیایی مصرف کرد. اوره از آمونیاک ساخته می‌شود و می‌توان آن را به عنوان کود و یا در تهیه پلاستیک‌ها به کار برد. آمونیاک در تولید نایلون و به عنوان جزء سازنده‌ای از پاک کننده‌های خانگی مصرف می‌شود.

۱۴-۱- روش‌ها و تکنولوژی‌های موجود در صنعت ککسازی

به طور کلی، دو فرآیند تجاری ثبت شده برای ککسازی در درجه حرارت‌های بالا ثبت شده است که تحت عناوین روش کندویی^۱ (نوع بدون بازیافت/ بازیافت حرارت^۲) و فرآیند بازیافت مواد جانبی^۳، شناخته شده‌اند. البته روش کندویی از نوع بدون بازیافت، کاملاً منسخ شده و امروزه روش بازیافت حرارت توسعه یافته، جایگزین آن شده است. تفاوت ککسازی به روش کندویی از نوع بازیافت حرارت و روش بازیافت مواد جانبی در **جدول ۳-۱** نشان داده شده است. در ادامه روش‌های بازیافت مواد جانبی و بازیافت حرارت بصورت مفصل آورده شده است.

جدول ۳-۱- تفاوت ککسازی به روش‌های بازیافت مواد جانبی و بازیافت حرارت.

By product	محصول جانبی	بازیافت حرارتی
مثبت	فشار ستون خشک کن	منفی - مکشی
ارتفاع بیش از عرض	شكل خشک کن	عرض بیشتر از ارتفاع
تولید ذرات معلق و سمی	آلودگی هوا	عدم آلودن هوا و تولید سموم
گاز سرد شده، آب	سیستم سرمایش	فقط آب
فاضلاب اضافی تولید می‌کند	فاضلاب و پساب	بدون فاضلاب، آب قابل بازیافت است
کمتر از بازیافت حرارتی	حداکثر دمای نهایی خشک کن	بیشتر از محصول جانبی
مستعد به فشار دیواری	فشار دیواره‌ای	عدم فشار دیواره‌ای مگر در لحظه تشویه که در تماس با دیواره وجود دارد
وجود دارد بدلیل Sticker	امکان تخریب خشک کن	وجود ندارد بدلیل Sticker ها
مناسب است	انقباض زغال سنگ	نامناسب و غیر قاعده‌مند
نامرغوب‌تر از بازیافت حرارتی	کیفیت کک	کک تولید شده تا دمای بالاتری می‌تواند گرم شود در ضمن استحکام سرد و داغ بیشتری دارد
با تغییر در هر واحد، روی سایر واحدها اثر گذاشته و میزان محصول تغییر می‌کند	استقلال روش	واحدها بصور مستقل کار می‌کنند
انعطاف پذیری محدود	کاربرد کیفی زغال سنگ	انعطاف پذیری بیشتر
بیشتر	(OPEX) هزینه مصرفی	کمتر
بیشتر	(CAPEX) هزینه سرمایه‌گذاری	کمتر

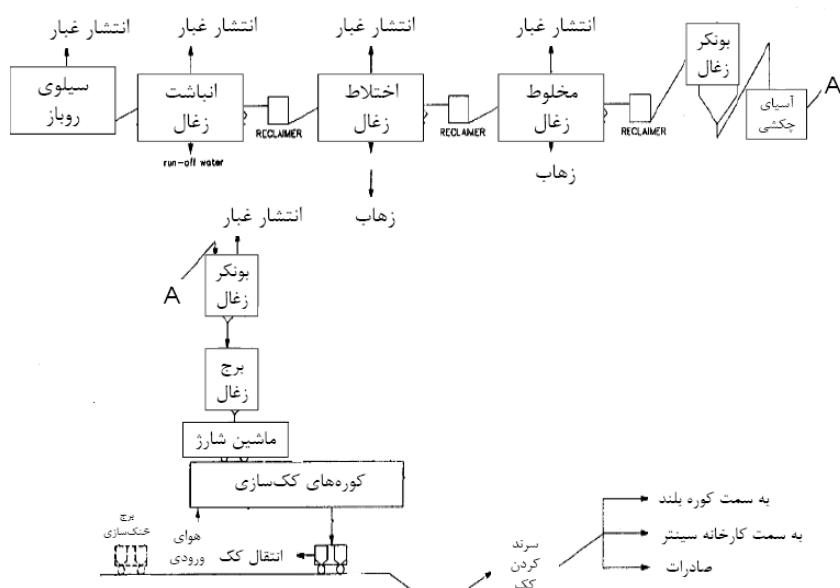
¹ Beehive process

² Heat Recovery

³ By Product Recovery

۱-۱۴-۱- روش بازیافت مواد جانبی

روش بازیافت مواد جانبی یکی از روش‌های مهم ککسازی است. در این روش، مواد فرار ناشی از حرارت دهی زغال‌سنگ جمع‌آوری و طی مراحلی به مواد جانبی همچون قطران، بنزول خام، آمونیاک و گاز سوختی تبدیل می‌شود. نمای کلی از واحدهای کک سازی به روش بازیافت مواد جانبی در **شکل ۹-۱** نشان داده شده است. باطری ککسازی شامل مجموعه‌های از ۳۰ الی ۱۲۰ کوره (سلول) ککسازی می‌باشد. به طور کلی، تکنولوژی ککسازی به روش بازیافت مواد جانبی شامل چهار مرحله اصلی است. این مراحل شامل بخش آماده‌سازی زغال، بخش ککسازی، بخش انتقال کک و بخش بازیابی و پالایش مواد شیمیایی است.



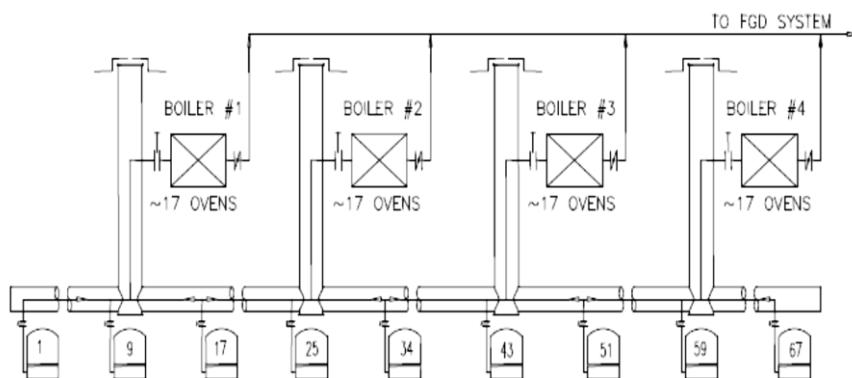
شکل ۹-۱- نمای کلی از مراحل ککسازی به روش بازیافت مواد جانبی.

۱-۱۴-۲- روش بازیافت حرارت

فرآیند بازیافت حرارت، یکی از دو روش مورد استفاده در فرآیند ککسازی است. در این روش برخلاف روش بازیافت مواد جانبی، مواد جانبی حاصل از کربنیزه کردن زغال، در داخل کوره سوزانده و بازیافت نمی‌شوند. ولی حرارت اضافی تولیدی بازیابی شده و به انرژی الکتریسیته تبدیل می‌شود. باطری ککسازی شامل مجموعه‌ای از ۲۰ الی ۱۰۰ کوره ککسازی (با توجه به ظرفیت) می‌باشد. به طور کلی، تکنولوژی ککسازی به روش بازیافت حرارت شامل سه مرحله اصلی است. این مراحل شامل بخش آماده‌سازی زغال، بخش ککسازی و بخش بازیابی حرارت است. در ادامه این مراحل توضیح داده شده است. فلودیاگرام

مربوط به واحد ککسازی به روش بازیافت حرارت واقع در ایالت ایندیانا آمریکا با ظرفیت تولید $1/3$ میلیون تن کک در سال،

۹۰ مگاوات انرژی الکتریسیته در **شکل ۱۰-۱** نشان داده است.



شکل ۱۰-۱ - فلودیاگرام واحد ککسازی ایندیانا.

ویژگی‌های فرآیند ککسازی به روش بازیافت حرارت در زیر آمده است:

۱) نیازمند به واحد بازیافت مواد جانبی نمی‌باشد، کلیه مواد فرار در داخل کوره‌ها می‌سوزند.

۲) سازگار با محیط زیست است. کوره‌ها تحت مکش (فسار منفی) کار می‌کنند.

۳) متناسب برای بکارگیری زغال‌های با درجه زغال شدگی بالا و یا پایین در مخلوط زغال، بدون ایجاد آثار سوء بر کوره می‌باشد. مراحل کلی ککسازی به روش بازیافت حرارت شامل سه مرحله آماده‌سازی زغال، کک سازی و بازیافت حرارت است.

۱۵-۱ - مواد اولیه ککسازی و تکنولوژیهای موجود ککسازی

۱۵-۱-۱ - درجه‌بندی زغال‌ها

بطور کلی می‌توان گفت که زغال‌سنگ جسمی است بیشکل (آمورف) شامل کربن، هیدروژن، اکسیژن و مقدار جزئی ازت و گوگرد. اولین موضوع اصلی که در ککسازی مورد نظر قرار می‌گیرد، عبارتست از تهیه کک برای کوره بلند. کک کوره بلند، ککی است که دارای مقاومت مکانیکی کافی بوده و سایر خصوصیات لازم برای عملیات کوره بلند و تهیه چدن مرغوب را داشته باشد. باید دانست که انواع مختلف زغال‌هایی که در صنعت ککسازی مصرف می‌شود باید دارای خصوصیات لازم برای ککسازی باشند. مثلاً یکی از خواص زغال‌سنگ در این است که موقعی که آنرا بدون تماس با هوا گرم می‌کنیم کلوخه شده و منجر به تشکیل کک متراکم می‌شود.

بعضی از زغال‌ها دارای چنین خاصیتی می‌باشد؛ اما این زغال‌ها در طول فرایند ککسازی به مقدار زیادی متورم شده و تغییر حجم می‌دهند و تولید فشار نسبتاً زیادی در داخل کوره ککسازی می‌کند در نتیجه بدنه داخلی کوره که از آجر نسوز

درست شده است، به تدریج تخریب می‌شود. موقعی که زغال‌سنگ بدون تماس با هوا برشته و سرخ می‌شود ترکیب آن تغییر می‌نماید یعنی از آن گازهایی خارج می‌گردد که به آنها محصولات گازی می‌گویند. اگر زغال‌سنگ را در یک بوته چینه آزمایشگاهی برشته کنیم، پس از خروج گازها از آن، باقیمانده سخت کربنی بجا می‌ماند که به آن کک باقیمانده گویند. بوسیله این آزمایش می‌توان مرغوبیت زغال‌سنگ را برای ککسازی معین کرد. در صورتیکه مقدار کک بدست آمده در حین ککسازی زیاد نباشد، از بالای کوره ککسازی مقدار نسبتاً زیادی گازهای فرار بدست می‌آید که ماده اولیه خوبی برای صنایع شیمیایی و حرارتی است. زغال‌سنگ‌ها را بر حسب مقدار مواد فرار و قابلیت فرم پذیری و با مقدار انبساط حجمی طبقه‌بندی می‌نمایند.

در اوایل صنعت ککسازی فقط از زغال نوع K برای ککسازی استفاده می‌شود ولی امروزه به دلیل محدود بودن ظرفیت معادنی که دارای زغال نوع K می‌باشد لذا زغالی که امروزه برای کک سازی مصرف می‌شود مخلوط مناسبی از زغال‌های مختلف است.

۱-۱۵-۲- مخلوط زغال (blend)

مخلوط زغال‌های R,S,K,L,T است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که عبارتست از مخلوط زغال‌های متفاوتی blend می‌باشد که از معادن مختلف بدست آمده‌اند. هر یک از زغال‌هایی که از معادن مختلف بدست آمده در صورتیکه از نظر قابلیت مخلوط شدن^۱ اختلاف کمی با هم داشته باشد، باهم در یک گروه واحد قرار می‌گیرند که آنرا گروه معدنی می‌نامند. مطالعه در مورد زغال‌ها باعث می‌شود که بتوان مخلوط‌شوندگی را از نظر قابلیت ککشدن و انتخاب مناسب آنها برای تهیه بهترین نوع کک را تهیه کرد. از روی مقدار گازهای فرار به دست آمده و مشخصات کک باقیمانده می‌توان نوع زغال‌سنگ را از نظر ککشوندگی کاملاً مشخص نمود. برای بدست آوردن نوع معین کک و یا به عبارت دیگر برای تهیه کک مناسب لازم است که خواص پلاستیکی زغال‌ها دانسته شود.

۱-۱۵-۳- درجه‌بندی زغال‌ها براساس خواص پلاستیکی

وقتیکه مراحل ککسازی مورد بررسی قرار گیرد، مشاهده می‌شود که ابتدا زغال‌سنگ بدون تماس با هوا یا در مجاورت هوای کم، گرم می‌شود؛ در درجه حرارت معینی گداخته شده و تبدیل به یک نوع زغال با حالت خمیری می‌گردد؛ یعنی کم و بیش حالت یک جرم پلاستیکی را بخود می‌گیرد و این جرم در حرارت‌های بالاتر ابتدا تبدیل به نیمه کک و سپس تبدیل به کک می‌شود و در این حالت است که فرآیند ککسازی در کوره کامل می‌شود. نوع کک تهیه شده به مقدار نسبتاً زیادی بستگی به

¹ Blend

خواص پلاستیکی حاصله ضمن فرآیند ککسازی دارد. یعنی با ملاحظه رفتار زغال سنگ در حالت پلاستیکی می‌توان در مورد نوع ککی که از زغال سنگ فوق حاصل می‌شود، اظهار نظر نمود.

اظهار نظر درباره ککشدن زغال سنگ براساس خواص پلاستیکی آن، اساس آزمایش پلاستومتری می‌باشد که توسط پروفسور ساپوژنیکف^۱ ابداع شده است. مطابق این روش وقتی زغال سنگ در دستگاه پلاستومتر مورد آزمایش قرار داده شود،

تغییراتی که در آن بوجود می‌آید، عبارتست از:

- تغییر حجم پلاستیکی (X)، و

- قطر لایه‌های پلاستیکی (Y).

در مطالعه‌ای که روی مقدار زیادی از زغال‌ها براساس روش پلاستومتری بعمل آمده، معلوم شده است که با تعیین X و Y بر حسب میلیمتر می‌توان مشخصات زغال را جهت تهیه کک معلوم کرد.

براساس روش پلاستومتری امروزه به عوض اینکه زغال‌ها را بر حسب مواد فرار حاصله و یا مشخصات کک باقیمانده طبقه-بندی کنند، آنها را بر حسب خواص پلاستیکی X و Y (جدول ۴-۱)، طبقه‌بندی زغال را براساس آزمایشهای پلاستومتری مشخص به گروه‌های معدنی تقسیم‌بندی می‌نمایند. بنابراین برای مخلوط خوب که خواص پلاستیکی آن برای تهیه کک مورد قبول باشد، لازم است که خواص پلاستیکی کلیه زغال‌های موجود در مخلوط به خوبی مشخص شود.

قطر لایه‌های پلاستیکی مخلوط را می‌توان از روی قطر لایه هر یک از اجزا متشکله بطور تقریبی حدس زد. تغییر حجم پلاستیکی (X) مخلوط زغال‌ها نسبتاً مشکل‌تر است؛ یعنی نمی‌توان تغییر حجم پلاستیکی زغال را از مجموع انقباضات هر یک از اجزا متشکله مخلوط بدست آورد. طبق نظریه ساپوژنیکف مخلوط‌های مناسب برای ککسازی بایستی دارای خواص پلاستیکی بند زغال کک (جدول ۴-۱) باشند تا بتوان از آنها کک‌های مناسب برای کوره بلند تهیه نمود.

جدول ۴-۱- طبقه‌بندی زغال بر اساس آزمایشهای پلاستومتری.

گروه معدنی	قطر لایه پلاستیکی بر حسب میلیمتر	انقباض پلاستیکی بر حسب میلیمتر		
	از	از		
تا	تا	تا		
Zgal Gazar G	۱۰	۱۴	۲۵	۴۰
Rsh	۱۵	۲۵	۱۵	۳۵
Rat		بیش از ۲۷	کمتر از ۱۵	
RI	زغال چال متوسط	این زغال دارای خواصی بین خواص زغال های چال دیگر است.		
RW	۲۰	۲۷	کمتر از ۱۲	
زغال کک	۱۶	۲۲	کمتر از ۲۰	
S	۵	۱۵	بدون انقباض	
T	بالاتر از ۵	بدون انقباض		

^۱ Sapozhnikov

در ککسازی برای آمیختن صحیح زغالسنگ جهت تهیه مخلوط باید علاوه بر مقاومت، خصوصیات دیگری را نیز معین کرد که عبارتند از:

۱) اندازه دقیق قطعات زغالسنگ،

۲) کافی بودن و به اندازه بودن (نه کم و نه زیاد) حجم بین قطعات،

۳) در نظر گرفتن حداکثر انقباض کک حاصله برای آسانتر خارج شدن کک از کوره در روش‌های شارژ از بالا.

در زغالسنگ، معمولاً مقداری ناخالص وجود دارد که از ارزش زغالسنگ می‌کاهد و این ناخالصی‌ها عبارتند از:

۱) خاکستر که بصورت ترکیبات ناخالص غیر قابل احتراق می‌باشد.

۲) گوگرد که بصورت ترکیبات گوگردی می‌باشد.

خاکستر موجود زغالسنگ که در حین فرآیند ککسازی تماماً در کک باقی می‌ماند، یکی از مهمترین مشخص کننده‌های نوع زغالسنگ است. به علاوه به علت خارج شدن گازهای فرار، وزن کک به دست آمده کمتر از زغالسنگی است که کک از آن حاصل شده است. بنابراین درصد خاکستر موجود در کک بیشتر از درصد خاکستر موجود در مخلوط اولیه (زغال) می‌باشد.

خاکستر موجود جسم مضری در کوره بلند بوده و باعث می‌شود که اولاً درصد ماده قابل احتراق در کک کم گردد، ثانیاً برای اینکه ذوب شود و به سیلان درآید احتیاج به حرارت اضافی دارد. بنابراین موقعیکه کوره بلند با ککی که دارای خاکستر زیاد باشد کار کند، راندمان آن کم شده و مصرف کک افزایش می‌یابد. لذا برای به دست آوردن کک خوب، لازم است که خاکستر موجود در زغال سنگ از حدود ۹٪ (در برخی مراجع تا ۱۱ درصد نیز گزارش شده است) تجاوز نکند و زغال‌هایی که بیش از این مقدار خاکستر دارند قبل از مصرف در ککسازی باید از خاکستر پاک شوند؛ یعنی قسمتی از خاکستر آن بایستی گرفته شود تا مقدار خاکستر حداکثر ۹-۱۰٪ باشد.

یکی دیگر از مشخصاتی که از نظر خلوص زغالسنگ اهمیت دارد، گوگرد موجود در آن است. مقدار بسیار ناچیزی از گوگرد در حین فرآیند ککسازی بصورت ترکیبات گازی از زغالسنگ خارج می‌شود. ولی قسمت اعظم آن در کک باقی می‌ماند یعنی اینکه اگر کک بدست آمده را توزین نماییم مقدار کمی از زغالسنگ در حین ککسازی مصرف شده و تحلیل می‌رود. اما درصد گوگرد موجود در کک تقریباً به همان اندازه که در مخلوط زغال اولیه وجود داشت، باقی می‌ماند.

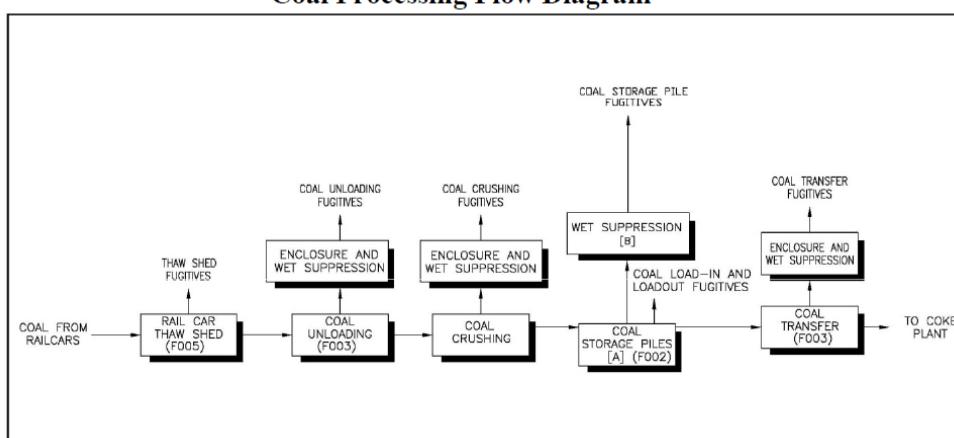
باید دانست که گوگرد موجود در کک زیان بخشنده از خاکستر موجود در آن در طی فرآیند کوره بلند است. زیرا در کوره بلند گوگرد موجود در کک به محصول وارد شده و در نتیجه از مرغوبیت چدن حاصله کاسته و آنرا ترد و شکننده می‌نماید و از طرفی به علت فعل و انفعالاتی که گوگرد در حین فرآیند کوره بلند انجام می‌دهد، باعث پایین آمدن راندمان کوره بلند می‌گردد و مصرف کک افزایش می‌یابد. لذا مقدار گوگرد موجود در کک از حدود ۱٪ نباید تجاوز نماید.

از آنجائیکه قسمتی از گوگرد موجود در زغال سنگ بصورت ترکیبات معدنی (پیریت) بوده که تشکیل دهنده خاکستر کک میباشد، بنابراین موقعی که زغال سنگ را از نظر خاکستر موجود در آن فرآوری کنیم، همزمان با آن تا حدی از گوگرد موجود در زغال سنگ نیز تقلیل مییابد. رطوبت موجود در زغال سنگ که در کوره ککسازی مصرف میشود بهتر است در حدود ۶٪ باشد و اگر مقدار رطوبت بیشتر باشد (بیشتر از ۹٪ نیاید باشد) مقدار نسبتاً زیادی از حرارت موجود در کوره ککسازی صرف تبخیر آن خواهد شد و عملیات کک سازی را طویل میکند و در نتیجه راندمان اقتصادی و مکانیکی کوره را پائین میآورد. در بهرهبرداری از محصولات فرعی بدست آمده مشاهده شده است که از زغالهایی با درصد رطوبت ۱۰-۹٪ نیز برای- ککسازی استفاده میشود و این یکی از مهمترین معایب روش مرطوب تمیز کردن زغال سنگ میباشد. به طوریکه قبل‌اهم گفته شد مخلوط زغالها از درجات متفاوت یا به طور دقیق‌تر از مخلوط ترکیبات مختلف به منظور تهیه کک ساخته و مخلوط میشوند. نحوه اختلاط زغالهای مختلف به منظور تهیه مخلوط و تعیین حدودی که برای تمیز کردن زغال سنگ از نظر خاکستر و گوگرد باید انجام شود، بستگی به نوع ککی دارد که از آن تهیه میشود؛ یعنی برای ککهای کوره بلند یا کک چدن ریزی با کک برای کارهای متالوژی غیر آهنی و غیره متفاوت است.

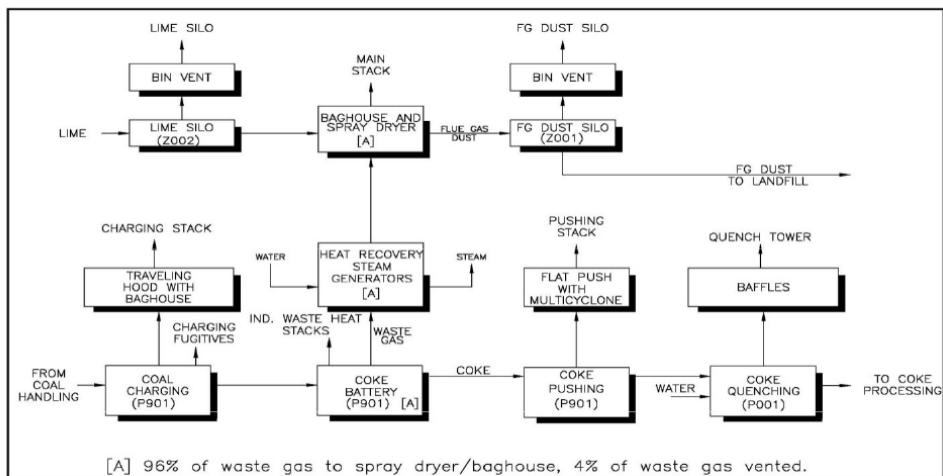
نوع زغالها و مقداری که باید فرآوری شود، متفاوت است. به علاوه انتخاب مخلوط زغال سنگ فقط از نقطه نظر نوع ککی که باید از آن تهیه شود مورد توجه نمیباشد؛ بلکه درصد گازهایی که از کوره ککسازی حاصل میشود نیز مورد توجه است. تمام فرایند مربوط به انتخاب مخلوط زغال سنگ و آماده کردن آن برای ککسازی در قسمت آماده‌سازی زغال سنگ و بونکرهای اختلاط انجام می‌گیرد.

در شکل‌های ۱۱-۱ تا ۱۳-۱ نمونهای از فرآیندهای ککسازی از مرحله آماده‌سازی زغال تا آماده‌سازی کک برای مصرف ارائه شده است.

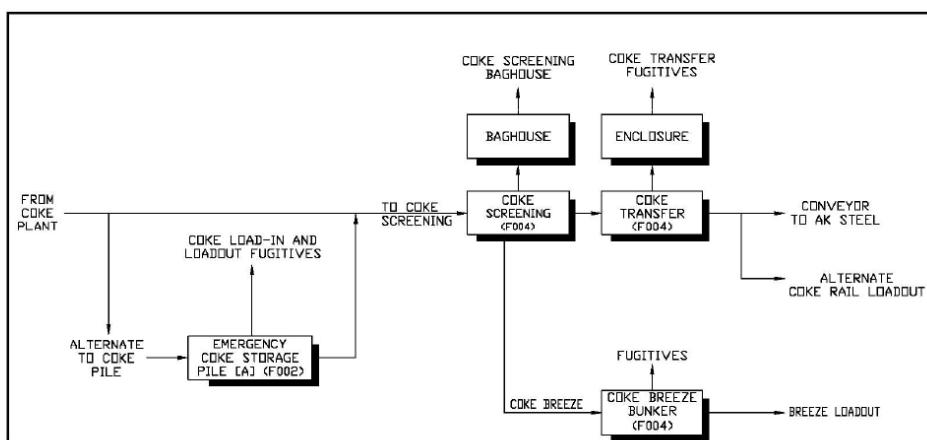
Coal Processing Flow Diagram



شکل ۱۱-۱ - فلودیاگرام آماده‌سازی زغال جهت ککسازی.



شکل ۱۲-۱- فرایند تولید کک.



شکل ۱۳-۱- فرایند آماده سازی کک جهت مصرف.

۱-۱۶-۱- آماده سازی زغال سنگ برای ککسازی

در قرن گذشته و در اوایل پیدایش صنعت ککسازی به دلیل اینکه مصرف کک در صنعت کم بود و تکنیک تهیه کک نیز پیشرفت نکرده بود، از معادنی استفاده می شد که زغال سنگ استخراج شده از آنها برای کک سازی کاملاً مناسب بود و از معادنی که دارای زغال سنگ نامرغوب بود استفاده نمی شد. در نتیجه ذخایر زغال سنگ های مستعد برای ککسازی رو به کاهش گذاشت. با پیشرفت صنایع متالورژی و همچنین اضافه شدن احتیاجات صنعتی در تهیه انرژی مصرف کک به مقدار قابل توجهی بالا رفت. به این دلیل با انجام آزمایشها و ایجاد شرایط مختلف دستورالعمل هائی برای استفاده از زغال سنگ های نامرغوب برای تأمین احتیاجات صنعتی تدوین شد.

از روش‌هایی که انجام آن در این مورد پیشنهاد شد، مخلوط زغال‌سنگ از انواع مختلف با درصدهای معین است که به نتیجه مطلوبی منجر می‌شود. در حال حاضر برای افزایش حجم کک انواع زغال‌ها با درصدهای مختلف با هم مخلوط شده و به کوره ککسازی فرستاده می‌شود.

قواعد مخلوط کردن مواد خام با در نظر گرفتن تمام شرایط بشرح زیر است:

الف) کم کردن خاکستر و افزایش غلظت مواد خام با شستن و بطور کلی انجام عملیات مختلف تغليط مواد که در نتیجه شرایط شیمیایی و مکانیکی مواد حاصله نیز بهتر می‌شود.

ب) افزایش سرعت فرایند ککسازی و در نتیجه بهتر شدن قابلیت پخت مواد خام.

* باید در نظر داشت که افزایش زیاد از حد درجه حرارت باعث خرد شدن قطعات کک می‌گردد.

دقت در انتخاب نوع زغال‌سنگ برای تهیه مخلوط ککسازی مهم می‌باشد زیرا اگر در مواد خام زغالی از گروههای T و R وجود داشته باشد، کک نسبتاً خوبی بدست می‌آید و اگر خواسته شود کک درشت‌تری بدست آید، لازمست که از زغال‌های T و K استفاده شود. یکی از خواص اصلی کک، استحکام و درشتی کافی آن است. بطور کلی خواص کک حاصله به ترکیب زغال‌سنگ بستگی دارد. هنگام مخلوط کردن زغال‌سنگ و تهیه مخلوط، بایستی مقدار مصرفی هر نوع زغال و همچنین ظرفیت انبارهای ذخیره را در نظر گرفت.

در مورد تقسیم‌بندی زغال‌سنگ به گروههای مختلف نیز باید به نوع آنها دقیقاً توجه نمود و زغال‌های را در یک انبار ذخیره نمود که خواص آنها تقریباً مشابه هم باشند. گروه‌بندی زغال‌سنگ باعث آسان شدن فرایند ککسازی و همچنین تنظیم و ایجاد شرایط اصلی مواد خام یعنی خروج مواد فرار، قابلیت کک شدن و کلوخه شدن می‌گردد. آماده کردن زغال‌سنگ برای ککسازی شامل یک سری عملیات متوالی مانند تغليط، مخلوط کردن، خرد کردن، سرند کردن، خشک کردن و غیره است. تغليط کردن زغال‌سنگ، عبارتست از عملیاتی که مواد ناخالصی از جمله سنگ و خاک را که با زغال‌سنگ مخلوط می‌باشد از آن جدا می‌کنند و در نتیجه درصد زغال‌سنگ خالص در مواد خام بالا می‌رود. هنگام تغليط محتويات مضر در عمل ککسازی از جمله گوگرد و فسفر کم می‌شود و در نتیجه با عمل تغлиط خواص کک حاصله بهتر می‌شود.

۱-۱۶-۱- فرآوری زغال سنگ به روش خشک و مرطوب

کار بخش آماده‌سازی زغال‌سنگ در تأسیسات ککسازی این است که زغال‌های خام استحصالی از معدن^۱ را دریافت داشته و از آنها مخلوط مناسبی برای کک سازی آماده کنند. زغال‌های هستند که بدون اینکه فرآوری کلی روی آن انجام گیرد، به همان شکل که از معدن تهیه شده است به قسمت تأسیسات ککسازی آورده می‌شود. در بعضی از معادن

¹ ROM

زغالهای وجود دارد که دارای خاکستر کم می‌باشند. این چنین زغال‌ها را می‌توان بدون فرآوری برای تهیه مخلوط مورد استفاده قرار داد. و زغالهای را که دارای خاکستر زیاد باشد، ROM پرخاکستر می‌گویند.

زغالهای پرخاکستر ROM باید قبل از مصرف فرآوری گردد.

جهت آماده سازی زغال‌سنگ، انواع متعددی مورد مصرف قرار می‌گیرند:

۱) در صورتیکه تأسیسات ککسازی زغال‌سنگ تمیز دریافت دارد.

۲) در صورتیکه تأسیسات ککسازی زغال‌سنگ پرخاکستر دریافت دارد.

۱۶-۲-۱- مواد خام برای ککسازی

زغال‌سنگ استخراج شده را قبل از آنکه برای عملیات پخت و کلوخه‌شدن به باطریهای ککسازی فرستاده شود بایستی عملیاتی مانند تغليظ، کلاسه بندی، خرد کردن و غیره روی آن انجام داد. بطور کلی کارخانه ککسازی تهیه کک از زغال‌سنگ و تأمین احتیاجات کارخانجات متالورژی می‌باشد. برای آنکه انواع زغال‌سنگ‌ها از یکدیگر مشخص شوند آنها را بوسیله علامات اختصاری به ترتیب زیر نامگذاری می‌کنند:

D	زغال شعله ای بلند
G	زغال گاز دار
R	زغال سنگ چاق
K	زغال کک سازی
O	زغال سنگ ضعیف
T	زغال سنگ لاغر

مارکهای مشروحة فوق حرف اول نامهای روسی زغال‌سنگ‌ها می‌باشند. اغلب برای تهیه زغال‌سنگ مناسب از نظر تکنیکی و اقتصادی مخلوطی از زغال‌سنگ‌های معین با نسبت مشخص شدهای تهیه می‌کنند. در کلاسه بندی زغال‌سنگ، پارامترهای دیگر را نیز می‌توان در نظر گرفت؛ مانند درصد خروج مواد فرار و قطر قشر پلاستیکی.

مشخصات اصلی زغال‌سنگ عبارتند از: خروج مواد فرار و درصد آنها، قابلیت پخت، کلوخه شدن و قابلیت ککسازی. برای تهیه مخلوط مناسب از زغال‌سنگ پارامترهای مختلف فوق در نظر گرفته می‌شود. به کمک میکروسکوپ می‌توان ساختمان میکروسکوپی زغال‌سنگ را مطالعه نمود. زغال‌سنگ ممکن است علاوه بر کربن محتوى ناخالصی‌هایی مانند گوگرد، فسفر، هیدروژن، ازت و همچنین رطوبت باشد. زغال‌سنگ هنگام گداختن در حرارت‌های ۱۰۰ تا ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شود یا به عبارت دیگر آب آن بخار می‌شود. مقدار بخار آب حاصله در عمل ککسازی رطوبت زغال نامیده می‌شود.

حداکثر رطوبت قابل قبول برای زغالسنگ در محدوده ۶ تا ۹٪ است. مقدار خاکستر حاصله بستگی به مقدار مواد کانی مخلوط در زغالسنگ دارد. در آزمایشگاه، خاکستری را که در ۸۰۰ درجه سانتیگراد از کک باقی می‌ماند، درصد خاکستر موجود در کک گویند. مواد فرار نیز در اثر فعل و انفعالات شیمیایی که در کوره ککسازی به وجود می‌آید، تولید می‌شوند و مقادیر آن بر حسب درصد تعیین می‌گردد.

۱۶-۳- قابلیت پخت، کلوخه شدن

قطعات ریز زغالسنگ پس از ریختن در کوره و حرارت دادن، مقداری مواد فرار خارج و مقداری از آن نیز باقی می‌ماند که بعداً به کک تبدیل می‌شود. قطعات باقیمانده بهم می‌چسبند و قطعات درشتتری را بوجود می‌آورند. این عمل را کلوخه شدن گویند. قابلیت کلوخه شدن در مورد زغالسنگهای مختلف فرق می‌کند. عمل کلوخه شدن از حرارت‌های ۴۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد شروع می‌شود.

۱۶-۴- قابلیت ککشدن

بطور کلی ککشدن زغالسنگ شامل کلیه عملیاتی است که تا حرارت ۱۰۰۰-۱۱۰۰ درجه سانتیگراد به وقوع می‌پیوندد. برای تشخیص قابلیت ککشدن از متدهای پلاستومتری استفاده می‌شود. تقریباً یک چهارم از کلیه زغالسنگی که استخراج می‌شود، جهت صنایع ککسازی بکار می‌رود و سه چهارم از کک تهیه شده برای تهیه نیروی الکتریکی و عملیات کوره بلند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در عملیات ککسازی و صنایع وابسته به آن، بایستی احتیاط لازم بعمل آید؛ زیرا در این قسمت با انواع گازهای سمی و قابل احتراق روبرو خواهیم شد.

۱۶-۵- تبدیل زغالسنگ به کک

پس از انجام عملیات اولیه مانند تغليظ، کلاسه بندی، تهیه مخلوط، آن را در اتاقک‌های کوره ککسازی شارژ می‌کنند. در اثر وجود حرارتی که از دیوارهای اتاقک به زغالسنگ می‌رسد، تبدیل لازم برای تهیه کک انجام می‌شود. حرارت سطح دیوارهای در حدود ۱۰۰۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد است. دستگاههای گرمکننده هر اتاقک در تمام مدت جریان ککسازی گرمای یکنواختی را ایجاد می‌کنند. در نتیجه گرم شدن اتاقکهای محتوى زغالسنگ، گازهای فرار، بخار آب و غیره متصاعد شده و در انتهای فرایند، کک که همان مواد باقیمانده هستند، حاصل می‌شود. عمل ککسازی تحت فرایند پیچیده حرارتی و بدون دخالت هوا انجام می‌گیرد. در مدت عمل ککسازی، در اثر افزایش درجه حرارت از ابتدای شارژ تا انتهای فرایند، در حرارت‌های مختلف مواد متفاوتی به ترتیب زیر حاصل می‌شود:

- نیم کک (درجه حرارت نهائی در حدود ۵۰۰-۶۰۰ درجه سانتیگراد)
- کک تهییه شده در حرارت متوسط (درجه حرارت نهائی ۷۵۰ درجه سانتیگراد)
- کک تهییه شده در حرارت زیاد (درجه حرارت نهائی ۹۵۰-۱۰۵۰ درجه سانتیگراد)

۱-۱۶-۶- تغییرات حاصله در زغالسنگ در اثر تغییرات درجه حرارت

واضح است که پس از ریختن زغالسنگ در اتفاق ککسازی زغالسنگ به تدریج گرم شده و بنابراین در لحظات مختلف تحت اثر حرارت‌های معین قرار می‌گیرد. تأثیر درجه حرارت‌های مزبور روی گازهای خارج شونده به شرح زیر است:

- هنگام گرم شدن تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد رطوبت از زغال جدا می‌شود و در اثر ایجاد بخار آب گازهایی که در منافذ ریز زغالسنگ وجود دارد، از آن خارج می‌شوند.
- هنگام افزایش درجه حرارت تبدیل‌های حرارتی شروع می‌شود. در حرارت ۲۸۰-۳۸۰ درجه سانتیگراد، فعل و انفعالات شیمیایی آغاز می‌شود و گازهایی مانند CO_2 , CH_4 و هیدروکربورها و انواع فنلها بوجود می‌آیند.
- در ادامه عمل گرم کردن تا حرارت ۹۵۰ درجه سانتیگراد گازهای مختلف با نرخ‌های متغیر خارج می‌شوند.
- در بالاتر از ۹۵۰ درجه سانتیگراد مقدار گازها به سرعت کم می‌شوند.

- تغییرات مواد باقیمانده در اثر تغییرات درجه حرارت به قرار زیر است:

- در اثر خروج گازها و تجزیه حرارتی زغال در درجه حرارت ۳۸۰-۴۸۰ درجه سانتیگراد، عمل کلوخه‌بندی انجام می‌شود. در این هنگام محصول بدست آمده استحکام کافی را ندارد.
- با اضافه شدن درجه حرارت تا ۹۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد دوام و استحکام کافی در کک حاصل می‌شود.

عرض اتفاقکهای باتری محدود است. بنابراین قشر زغالی که نزدیکتر به دیواره اتفاق کفرار گرفته است، زودتر از زغال‌های مرکزی گرم می‌شود. با توجه به این مطالب می‌توان دریافت که در قشرهای مختلف، کک تحت تأثیر درجه حرارت‌های مختلف قرار می‌گیرد. بنابراین تبدیل کک در لایه‌های مرکزی به زمان‌های زیادتری نیازمند است. برحسب اینکه کک در ریخته‌گری، تهییه الکترود، تولید نیرو، و یا موارد دیگری مصرف شود، باید دارای خواص معینی باشد. خواص کک به ریزی و درشتی آن نیز بستگی دارد؛ مثلاً از کک‌های درشت به دلیل استحکام مکانیکی بیشتر در ریخته گری چدن و برای مصرف در کوره بلند استفاده می‌شود. معمولاً در عملیات ریخته‌گری چدن از کک‌هایی استفاده می‌شود که اندازه دانه‌های آن از ۴۰ میلیمتر کمتر نباشد. همچنین بایستی در این مورد مقدار گوگرد موجود در کک حداقل باشد.

از ککهای ۲۵-۱۰ میلیمتر برای تولید آلیاژهای آهن و از ذرات ریز کک برای کلوخه کردن سنگ آهن استفاده می‌شود. گوگرد موجود در کک باعث خراب شدن کیفیت فولاد و شکننده شدن آن می‌گردد. به این دلیل بایستی تا حد ممکن سعی شود که مقدار آن در کک کم باشد. فسفر نیز از عناصر مضر موجود می‌باشد که بایستی مقدارش خیلی کم باشد. خواص فیزیکی و شیمیایی کک بر حسب قابلیت ترکیب آن با اکسیژن تعیین می‌گردد.

معمولًاً کک تا اندازه‌ای اسفنجی است. مقدار این خلل و فرج را با توجه به حجم ظاهری و حجم واقعی آن تعیین می‌کنند. برای تقسیم بندی کک از نظر اندازه دانه‌های آن، از سرندهایی با سوراخهای چهار گوش استفاده می‌شود. بعضی از انواع کک، معمولًاً دارای منافذ و شکافهایی هستند که در آن نقاط از استحکام آنها کاسته می‌شود و در نتیجه باعث کم شدن مرغوبیت کک می‌شود و از اهمیت آن برای مصرف در کوره بلند می‌کاهد. با توجه به مباحث بالا می‌توان دریافت که استحکام، یکی از خصوصیات مهم کک می‌باشد و باید سعی نمود که با تنظیم شرایط کتسازی و تهییه مواد اولیه مناسب، ککی با خواص مطلوب بدست آورد.

۷-۱۶-۱ مشخصات کک متالورژیکی و نقش آن در کوره بلند

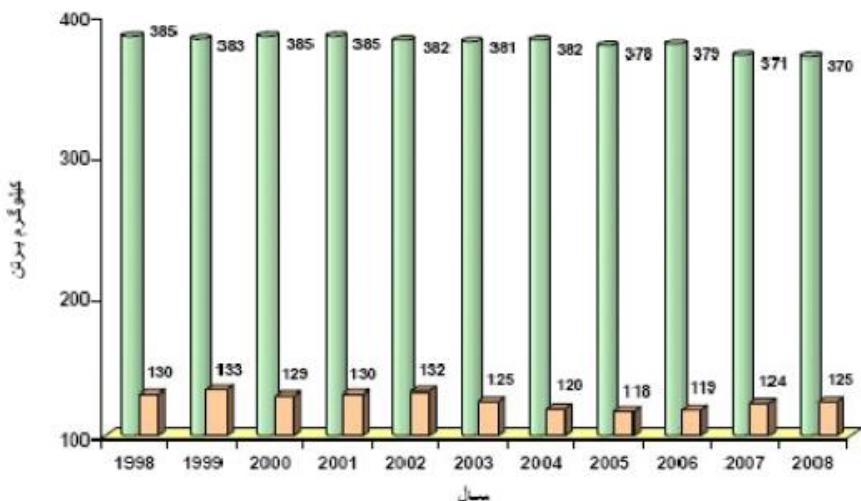
جهت بهره‌برداری روان، بدون اختلالات و حادثه کک مصرفی باید دارای خصوصیات فیزیکی، شیمیائی و مکانیکی مشخصی را داشته باشد. کک در کوره بلند چهار وظیفه اصلی را بر عهد دارد که عبارتند از:

- احیای سنگ آهن،
- ذوب آهن،
- حفظ و نگهداری ستون بار کوره،
- تأمین انرژی لازم برای فولاد سازی،

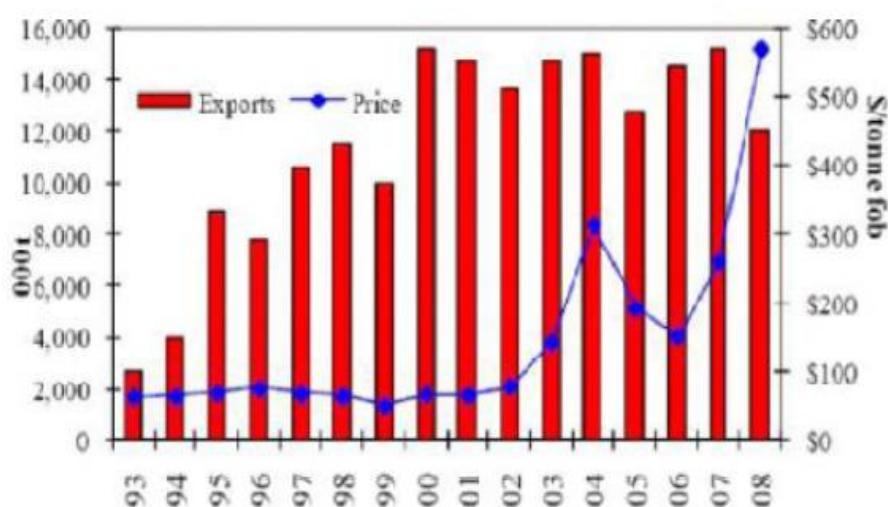
مشخصات مکانیکی CRI و CSR کک خیلی مهم است. به همین منظور در سالهای اخیر یکی از خواسته‌های مشتری اندازه‌گیری این خصوصیات است.

جهت کاهش مصرف کک در طول ۲۵ سال گذشته، تزریق سوختهای کمکی بخصوص تزریق پودر زغال در کوره‌های بلند رایج شده است. ضریب جایگزینی پودر زغال به جای کک در حدود ۱ است. امروزه در کوره‌های بلند کشور ژاپن به ازای هر تن چدن مذاب ۱۲۵ کیلوگرم پودر زغال تزریق می‌شود و میزان مصرف کک به ۳۷۰ کیلوگرم بازی هر تن چدن کاهش پیدا کرده است. در **شکل ۱۴-۱** روند تزریق پودر زغال و مصرف کک در کوره‌های بلند کشور ژاپن مشاهده می‌شود. در کشور آلمان نیز میزان تزریق پودر زغال و مصرف کک بازی هر تن چدن مذاب به ترتیب ۱۰۶ و ۳۶۶ کیلوگرم بازی هر تن چدن است. ضمناً تزریق مازوت نیز ۱۹ کیلوگرم می‌باشد.

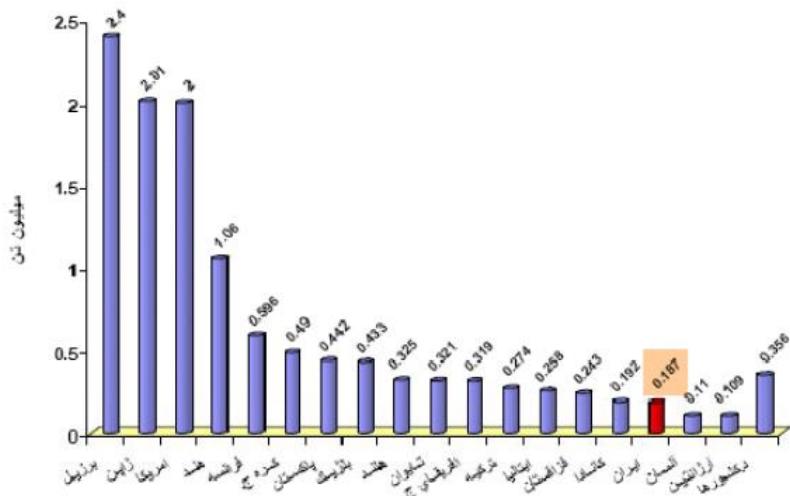
میزان تجارت کک جهان در حدود ۳۰ میلیون تن است که نصف آن را کشور چین انجام می‌دهد. روند صادرات و تغییر قیمت کک صادراتی کشور چین در [شکل ۱۵-۱](#) به نمایش درآمده است. در سال ۲۰۰۸ میزان صادرات کک کشور چین ۱۲/۱۳ میلیون تن بوده است. کشور لهستان بعد از چین بیشترین کک را به میزان ۶/۵ میلیون تن صادر می‌کند. بزرگترین وارد کننده کک جهان ۴/۹ میلیون تن، کشور آلمان است. قیمت صادرات کک بر اساس عرضه و تقاضا متغیر بوده است. در [شکل ۱۶-۱](#) میزان صادرات کک کشور چین به کشورهای مختلف جهان در سال ۲۰۰۸ ملاحظه می‌گردد.



شکل ۱۴-۱ - روند تزریق پودر زغال و مصرف کک در کوههای بلند کشور ژاپن.



شکل ۱۵-۱ - روند صادرات و تغییر قیمت کک صادراتی کشور چین.



شکل ۱-۱۶- میزان صادرات کک چین به کشورهای مختلف جهان در سال ۲۰۰۸

۱-۱۷- بررسی کامل روش‌های ککسازی (ضمیمه)

۱-۱۷-۱- مقدمه

انتخاب روش‌های ککسازی، بر اساس مطالعات مقایسه‌ای بر روی روش‌های متداول پذیرفته شده، صورت گرفته است. در راستای نیازها، مطالعات مقایسه‌ای روش‌های ککسازی متداول، با در نظر گرفتن ظرفیت کارخانه برای انتخاب مناسب‌ترین روش انجام می‌پذیرد.

۱-۱۷-۲- فرآیندهای ککسازی

فرآیند ککسازی، کربنیزه شدن زغال کک شواز طریق حرارت دادن آن می‌باشد. با توجه به روش تولید و خصوصیات منتج، کک می‌تواند به سه گروه اصلی تقسیم شود: کک کم گرمای دیده، کک متوسط گرمای دیده، کک زیاد گرمای دیده. در صورتیکه تولید کک با کیفیت بالا و ویژگی‌های مطلوب جهت استفاده در صنایع آهن‌سازی مدنظر باشد، فرآیند کربنیزه شدن در دمای بالا (حدود 1000°C) انجام می‌پذیرد. اگرچه تشکیل کک عمدتاً به زغال کک بستگی دارد، ولی کک تولید شده در دمای کم یا متوسط، حتی اگر از زغال کک با کیفیت بالا تولید شده باشد، برای استفاده در کوره‌های بلند نامناسب می‌باشد.

عمدتاً دو روش متداول تجاری برای تولید کک در دمای بالا وجود دارد روش لانه زنبوری (Non-recovery/ heat recovery) و روش بازیافت محصولات جانبی. در روش لانه زنبوری، هوا در خود محفظه ککسازی به منظور احتراق مواد فرار که در طول تقطیر زغال خارج شده، به میزان کنترل شده‌ای جریان می‌یابد تا باعث ایجاد گرمای شده و تقطیر بیشتری صورت گیرد. در روش بازیافت مواد جانبی، زغال کک در یک محفظه ککسازی به طور مستقیم و بدون حضور هوا، گرمای می‌بیند. گرمای مورد نیاز کربنیزه کردن از طریق احتراق گاز سوختی در محفظه‌های گرمکن که در کنار محفظه کربنیزه قرار دارند، تأمین

می‌شود. محفظه کربنیزه به کوره معروف است و گروه این کوره‌ها که به صورت پهلو به پهلو در کنار محفظه‌های گرمایی فرار دارند، یک باطری را تشکیل می‌دهد. در ککسازی نوع بازیافت محصولات جانبی گرمایی کوره‌ها برای کربنیزه کردن از طریق گاز خالص کوره کک یا گاز مخلوط شده تأمین می‌شود (عمدتاً گاز کوره بلند غنی شده با گاز کوره کک).

۱-۲-۱- فرآیند بازیافت گرمایی بدون بازیافت

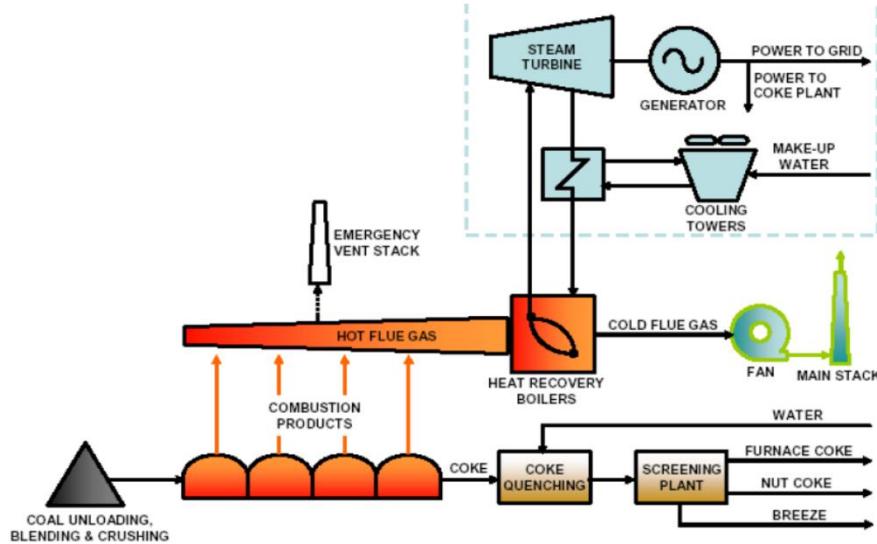
در گذشته، کوره‌های بازیافت گرمایی به خاطر شکل مخصوص آنها به کوره‌های لانه زنبوری معروف بودند. کوره‌های لانه زنبوری اولین نوع کوره‌های نوع بسته هستند که در آنها هوا به منظور سوختن جزئی زغال برای فراهم نمودن گرمای مورد نیاز کربنیزه کردن شارژ می‌شود. کوره‌های لانه زنبوری از قدمتی بیشتر از آنچه تصور می‌رود برخوردار بوده و برای عصاره‌گیری از چوب در قرن هفدهم مورد استفاده قرار می‌گرفته است. گازی که در طول کربنیزه شدن زغال بوجود می‌آید درون کوره سوخته و گرمای مورد نیاز برای فرآیند کربنیزه شدن زغال‌سنگ شارژ شده، تأمین می‌گردد. در کوره‌های لانه زنبوری، گازها بعد از سوختن به داخل یک حفره که در سقف کوره قرار دارد فرستاده و هدایت شده و سپس در درون جو آزاد می‌شود که این امر باعث آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود. کوره‌های مدرن HR مدل‌های پیشرفته کوره‌های لانه زنبوری می‌باشد. در کنار دیگر خصوصیات، کوره‌های پیشرفته HR در مقایسه با کوره‌های لانه زنبوری، آرایش گرمایی ویژه‌ای دارد و به تجهیزات مکانیزه مجهز شده‌اند.

- تکنولوژی کک سازی با بازیافت حرارتی مدرن

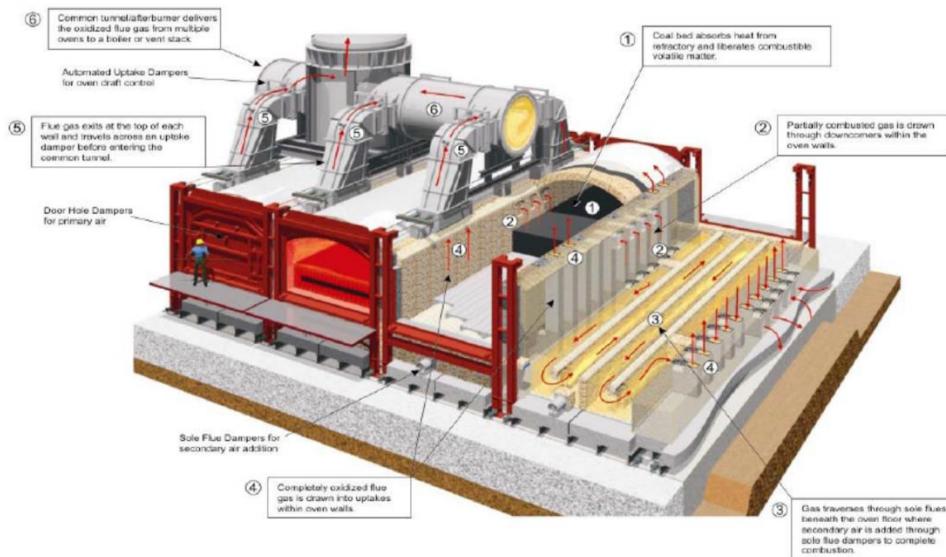
در دهه ۱۹۶۰ پیشرفته که در استرالیا رخ داد (شرکت سابق ککسازی Illawara) راه را برای پیشرفته تکنولوژی روش HR هموار کرد. البته این تکنولوژی بعلت سازگار بودن روش BPR با شرایط اقتصادی آن زمان کاربردی نبود و پس از آن نیز پیشرفت زیادی در تکنولوژی ککسازی HR صورت نپذیرفت. در طول دهه ۱۹۷۰، پیشرفته‌های جدیدی در شرکت‌های آمریکایی کک سازی Jewell و پس از آن در چین و هند صورت گرفت.

در فرآیند ککسازی HR، گرمای مورد نیاز از طریق سوختن مواد فراری که از زغال در طول کربنیزه شدن خارج می‌شوند، تأمین می‌گردد. سوختن موضعی کک/نیمه کک در لایه بالایی در فرآیند کربنیزه شدن کوره‌های HR اجتناب ناپذیر است. در کوره‌های HR سوختن قسمتی از مواد فرار داخل کوره و بر روی زغال با وارد کردن مقدار کنترل شده هوای جز اول صورت می‌گیرد. گازهای نیمه سوخته از داکت‌های پائین رو که درون دیوارها در دو طرف کوره‌ها تعییه شده‌اند به کف کوره هدایت می‌شوند. مسیرهای پیچ در پیچ ساخته شده، تمامی مقاطع در زیر کوره‌ها را پوشش می‌دهند. گازهای نیمه سوخته ناشی از محفظه کوره نهایتاً در مجاری کف کوره به کمک مقدار کنترل شده هوای ثانویه سوخته می‌شود. تمامی مواد فرار شامل هیدروکربن‌ها در مسیرهای کف کوره شکسته و سوخته می‌شوند. بنابراین گرمای مورد نیاز کربنیزه شدن از پائین و همچنین

از بالا تامین می‌گردد. میزان سوختن کک تابعی از هوای اضافه شده جزء اول، نحوه توزیع آن در طول کوره، منطقه سطح بالای زغال شارژ شده و همچنین تا حدی مقدار مواد فرار زغال شارژ شده می‌باشد. گازهای خروجی از کف هر یک از کوره‌ها در یک کلکتور جمع آوری می‌شود و به سمت دودکش هدایت و درون فضا رها می‌گردد.



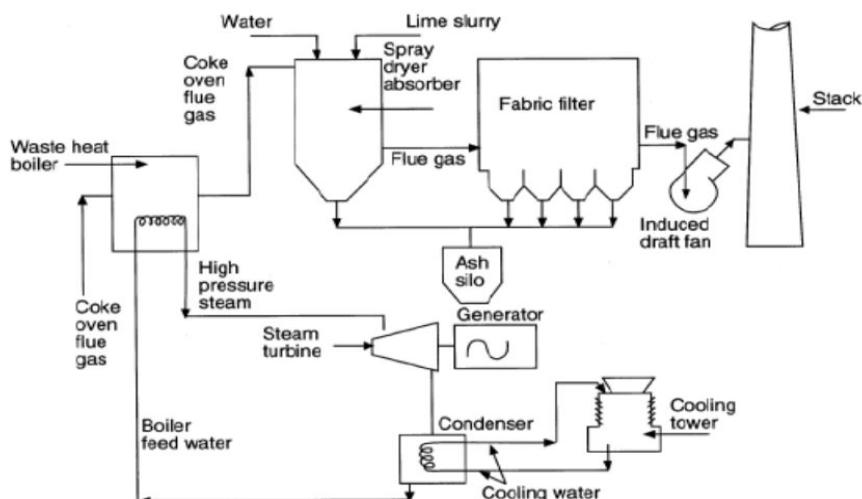
شکل ۱۷-۱- دیاگرام شماتیکی تکنولوژی کک سازی با بازیافت حرارتی مدرن.



شکل ۱۸-۱- شکل شماتیکی حریان گاز اون در روش HR.

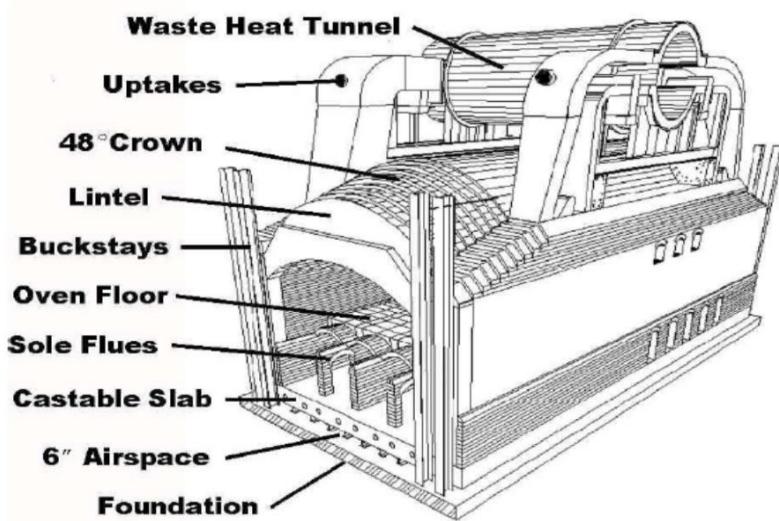
کوره‌های مدرن HR، از نوع دهانه مستطیلی، سقف گنبدی و مسیر خروج گاز در کف می‌باشند. فرآیند کربنیزه شدن با استفاده از حرارت ناشی از سوختن مواد فراری که از زغال شارژ شده در کوره‌ها خارج می‌شود، صورت می‌گیرد. گازهای داغ که در اثر کربنیزه شدن درون محفظه کوره آزاد می‌شود، به کمک مقدار کنترل شده هوای اولیه که از ورودی‌های تعییه شده در درهای (دربیچه‌های) کوره و برخی طراحی‌های موجود در سقف و کوره وارد کوره شده‌اند، به طور ناقص در محفظه کوره سوخته می‌شود. پسماندهای حاصل از احتراق جزئی پس از عبور از ورودی‌های تعییه شده در دیواره‌های کوره، از محفظه کوره به مسیرهایی به سمت پائین و کف کوره رانده می‌شود. گاز نیمه سوخته در مسیرهای کف کوره به کمک میزان کنترل شده هوای ثانویه کاملاً می‌سوزد. هیدروکربن‌های باقی مانده در گاز خروجی محفظه کوره به وسیله اضافه نمودن مقدار معینی هوا (بیشتر از حد استکیومتری) کاملاً شکسته و سوخته می‌شوند.

بنابراین کربنیزه شدن زغال فشرده از دو جهت صورت می‌گیرد: از طریق تشعشع از بالا، همچنین در داخل محفظه کوره و از راه هدایت گرما از کف کوره. تونل انتقال دهنده گاز خروجی کوره پس از عبور از درون یک بویلر به دودکش خروجی متصل می‌گردد. تمہیدات مورد نیاز در تونل گاز خروجی برای ایزووله کردن تا محل بویلر^۱ بازیافت حرارتی واحد تولید انرژی برق، تعییه شده‌اند. زمانیکه بویلر بازیافت حرارتی خارج از کار باشد، کوره‌ها به طور مکش طبیعی ناشی از اختلاف ارتفاع دودکش عمل می‌کنند. گاز داغ کوره‌های ککسازی در دمای بین ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد خارج می‌شود که این میزان حرارت برای استفاده جهت تولید انرژی برق در بویلر جوابگو می‌باشد.



شکل ۱-۱۹- دیاگرام شماتیکی واحدهای تولید انرژی و گوگردزدایی.

^۱ Boiler

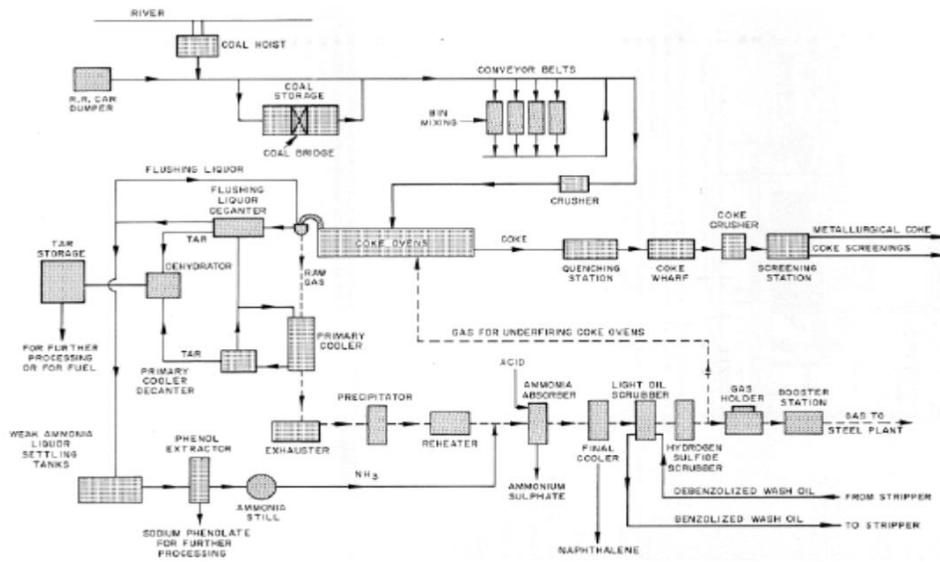


شکل ۱-۲۰-۱-۲-۲-۱۷-۱- فرآیند بازیافت محصولات جانبی (By-product recovery)

کوره‌های بازیافت محصولات جانبی BPR کک، کوره‌هایی هستند که به منظور جمع آوری مواد فرار خارج شده از زغال برخلاف فرآیند کک سازی HR که در آن فرآورده‌های فرار می‌سوزند، طراحی شده و عمل می‌کنند.

اجزای اصلی کوره به طور عمده شامل سه قسمت اصلی می‌شود. محفظه‌های ککسازی، مسیرهای خروجی گازهای گرم و محفظه‌های بازیابی کننده، که همه آنها از آجرهای نسوز ساخته شده‌اند. بدلیل ابعاد فیزیکی محفظه ککسازی کوره‌های بازیافت محصولات جانبی (باریک، بلند و طولانی)، گاهی به عنوان کوره‌های اسلات^۱ خوانده می‌شوند. کوره‌ها در باطری‌های ساخته شده‌اند که هر باطری حداقل دارای بیست و حداکثر صد کوره می‌باشد. فرآیند بازیافت محصولات جانبی به غیر از باطری شامل یک واحد مناسب برای بازیافت و جداسازی مواد ارزشمند متنوع موجود در گاز کوره کک می‌باشد. محفظه‌های ککسازی در یک باطری با محفظه‌های گرمایی به صورت یک در میان در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، در نتیجه، یک محفظه گرمایی در هر طرف از یک محفظه ککسازی قرار دارد. محفظه‌های بازیابی در قسمت تحتانی محفظه‌های گرمایی و ککسازی قرار دارند.

^۱ SLOT



شکل ۱-۲۱- دیاگرام شماتیک و پورسه تولید کک در روش By Product Recovery

در این روش سیستم‌های گرمایی مختلفی وجود دارند که مورد تایید طراحان متفاوتی (جهت نصب در کوره‌های کک) می‌باشد. البته این سیستم‌ها می‌تواند به دو گروه تقسیم شوند: نوع طراحی جریان تفنگی و نوع آندرجت^۱. در طرح جریان تفنگی، گاز سوختنی از راه داکت‌های افقی که از دو طرف به سمت مرکز هر دیواره گرمایی کشیده شده‌اند وارد می‌شود. داکت‌های اتصالی کوتاه به صورت عمودی به سمت بالا به سمت یک نازل قابل تنظیم در ته هر مسیر عمودی گرمایی هدایت می‌شوند. در سیستم آندرجت، گاز سوختنی از مسیرهای توزیع گاز در طبقه زیرین باطری، از طریق مسیرهای گاز ساخته شده که در قسمت‌های بازیابی و دیوارهای حفاظتی تعییه شده‌اند، وارد هر کوره گرمایی می‌شود. هر کدام از این بالابرها گاز به نازل‌های تعدیل کننده‌ای مجهز می‌باشند تا جریان گاز در هر مسیر گاز را کنترل کنند. هر دو نوع سیستم با یکدیگر تفاوت‌های بسیاری دارند. در همه آنها سعی شده است زغال را داغ کرده و در یک نسبت و دمای کنترل شده به شکل یکنواخت در امتداد طول و ارتفاع کوره به کک تبدیل نمایند. برای محدود کردن و کنترل دما در مجاورت مسیرهای گاز و جلوگیری از بالا رفتن دما تا حد ایمن (مکان‌هایی که در آن مواد نسوز سیلیکا مربوط به کوره کک حرارت می‌بینند)، سیستم گرمایی بر مبنای متناوب و معکوس شونده تعدیل می‌شود.

آجر سیلیکا به عنوان یک ماده نسوز کوره کک برای اولین بار در ایالات متحده آمریکا در اوخر قرن نوزدهم مورد استفاده قرار گرفت. سپس بعد از اثبات برتری این روش، مجدداً در کارخانجات ککسازی ایالات متحده در اوایل قرن بیستم مورد استفاده قرار گرفت و استفاده از آن نهایتاً عمومی شد.

¹ Underjet

سیستم‌های مختلف شارژ زغال به نام سیستم شارژ از بالا و شارژ فشرده که در کوره‌های HR مورد استفاده قرار می‌گرفتند، در کوره‌های کک، ماشین هدایت کننده (انتقال دهنده) کک و ماشین خنک کننده به منظور عملیات خاص سرویس دهی می‌شود. در یک باطربی شارژ فشرده، دستگاه فشرده سازی برای شکل‌گیری کک زغال فشرده لازم است. در باطربی‌های مدرن شارژ کک فشرده، عملیات فشردن، شارژ زغال فشرده و هل دادن کک توسط یک ماشین که به طور معمول به نام ماشین^۱ SCP معروف است، انجام می‌گیرد.

ابعاد محفظه ککسازی به پارامترهای واپسیه زیادی بستگی دارد که می‌تواند منجر به تولید کک با کیفیت مورد نظر شوند. بطور کلی، ابعاد یک محفظه ککسازی که در می‌تواند بین $\frac{8}{3}$ تا $\frac{4}{3}$ متر در ارتفاع، ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلیمتر در عرض و حدود ۱۳ تا ۲۱ متر در طول تغییر یابد. نصب کوره‌هایی با ارتفاع بین $\frac{4}{3}$ تا ۷ متر بسیار متداول است. در صورت نیاز به کوره‌هایی با ظرفیت تولیدی بالا، کوره‌های بلند با حجم محفظه بزرگتر ترجیح داده می‌شود. به همان نسبت، برای ظرفیت تولید کمتر از کوره‌هایی با ظرفیت تولیدی پائین‌تر، ارتفاع حدود $\frac{4}{5}$ متر استفاده می‌گردد.

گاز ناخالص از راه یک مجرای شب‌دار نسوز از کوره خارج شده و به یک زانویی که به کلکتور اصلی متصل است وارد می‌شود. کلکتور اصلی مجموعه کامل کوره‌های یک باطربی را سرویس دهی می‌نماید، همسو با باطربی کار می‌کند و در یک طرف یا در هر دو طرف قسمت فوقانی آن کشیده شده است. تقطیر بخش عمده قطران موجود در گاز خام، در کلکتور رخ می‌دهد. قطران مایع تقطیر شده و گاز خام به داخل خنک کننده گاز و بخش تقطیر قطران مایع رانده می‌شود. در این بخش، عمدتاً گاز کوره کک در دمای حدود ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد سرد می‌شود و قطران خام از محلول آمونیاکی در حین تقطیر جدا می‌شود. قطران خام با منظور ارسال به پالایشگاه قطران به تانک‌های ذخیره قطران انتقال داده می‌شود. تجهیزات اصلی مربوط به جريان گازها با توجه به ترتیب قرارگیری عمدتاً، خنک کننده گاز، ته نشین کننده الکترواستاتیک قطران و دستگاه مکنده می‌باشد. دستگاه مکنده، گاز را از کلکتور اصلی جمع آوری کننده گاز کک باطربی و بخش خنک کننده گاز مکش می‌نماید و گاز را با فشار به سمت واحدهای انجام فرآيند بر روی گاز هدایت می‌کند. در بسیاری از کارخانجات اروپایی، دستگاه مکنده در انتهای تجهیزات سیستم بازیافت محصولات جانبی BPR نصب شده است. بنابراین تمامی واحدهای مرتبط به جريان گاز در سیستم بازیافت محصولات جانبی BPR تحت مکش کار می‌کند.

میزان تناوب حرارت دادن کوره کک بروش BPR عمدتاً در چرخه معکوس شونده ۳۰ دقیقه‌ای قرار گرفته است. باطربی‌های که به دمایی با میانگین بالاتر برای دستیابی به محصول بیشتری نیازمند است، بایستی در چرخه تناوب ۱۵ یا ۲۰ دقیقه‌ای بدون

^۱ Stamping-charging-pushing

تجاوز از دمای بیشینه مجاز نگهداری شوند. حرارت دادن کوره کک یا با گاز خالص کوره کک یا با گاز رقیق شده با گاز دیگر صورت می‌گیرد (عمدتاً گاز کوره بلند که کمی با گاز کوره کک غنی شده است). باطری‌ها عمدتاً یا برای حرارت دادن با گاز غنی (حرارت تنها با گاز کوره کک) یا برای حرارت دادن هردو گاز غنی و گاز مخلوط طراحی شده‌اند. کوره‌هایی که می‌توانند با هر دو نوع گاز غنی شده و گاز مخلوط عمل کنند، به کوره‌های مرکب معروفند.

برای جلوگیری از خروج گازها و غبارها، وسایل کنترل آلودگی مختلفی به نام‌های دستگاه کنترل انتشار ناشی از شارژ کک، تخلیه کک، درب‌های پیشرفته کوره کک، سیستم پیشرفته گرمایی، توسط طراحان کارخانجات کوره‌های مدرن کک در نظر گرفته شده است.

کک‌سازی به روش بازیافت، به واحد بازیافت مواد جنبی برای استحصال مواد فرار خارج شده از زغال مجهر گردیده است. عملیات اولیه بر روی گاز، شوک سرد گاز خام گرم که اصولاً به گاز ناخالص (FOUL) معروف است، در دمای بین ۸۰ تا ۸۵ درجه سانتیگراد با پاشیدن مستقیم محلول آمونیاکی در کلکتور اصلی باطری می‌باشد. بعد از خنک‌سازی گاز، قبل از ارسال گاز خالص به سایت برای استفاده به عنوان سوخت، گاز خام از نظر آمونیاک، سولفید هیدروژن، نفتالین و بنزول، خالص‌سازی می‌گردد. در صورت استفاده از گاز خالص، بخشی از گاز خالص کوره کک (۴۳٪ تا ۵۰٪) برای حرارت دادن باطری کوره کک استفاده می‌شود. در صورت حرارت دادن با گاز رقیق شده، بخش کمی از گاز کوره کک (۴٪ تا ۷٪) برای غنی‌سازی گاز کوره کک استفاده می‌شود. در نمونه‌های عملی اجرا شده جهانی از دوتا سه دهه گذشته، عمل تقطیر قطران برای فرآوری قطران خام بلند استفاده می‌شود. در نمونه‌های عملی اجرا شده جهانی از دوتا سه دهه گذشته، عمل تقطیر قطران برای فرآوری قطران خام و پالایش و تولید بنزول، تولوئن (Toluene)، زایلن (Xylene) و غیره در بخش محصولات جانبی کارخانه کوره کک اجرا نشده است. بخش‌های مجزای فرآوری مرکزی، فعالیت‌های مربوط به فرآوری قطران و بنزول را انجام می‌دهند. به منظور کاهش هزینه‌های اساسی حتی بسیاری از کارخانجات بزرگ کک‌سازی، بازیافت بنزول خام از گاز کوره کک را حذف کرده‌اند. وجود بنزول خام در گاز کوره کک عمدتاً هیچ لطمه‌ای به کاربرد آن به عنوان سوخت کارخانه نمی‌زند. ارزش حرارتی گاز کوره کک تا حدی با وجود بنزول افزایش می‌یابد.

استانداردهای مربوط به کنترل آلودگی ملزم می‌دانند که آلاینده‌های فاضلاب قبل از رهایی و راهیابی به آبراه‌ها بایستی تصفیه و جداسازی شوند. محلول آمونیاکی مازاد و باقی مانده به منظور تصفیه آمونیاک، سولفید هیدروژن و سایر گازهای اسیدی در واحد بازیافت محصولات جانبی جمع آوری و فرآوری می‌شوند. کیفیت فاضلاب حتی بعد از تصفیه برای تخلیه یا استفاده درون کارخانه نیز مناسب می‌باشد. ترکیبات کربنی و نیتروژنی در واحد تصفیه فاضلاب کارخانه کک‌سازی تصفیه زیستی را انجام می‌دهند. این روش به صورت گستردگی برای کاهش یا برطرف کردن آلاینده‌های آب قبل از تخلیه به بیرون یا استفاده مجدد در کارخانه کاربرد دارد.

واحد بازیابی محصولات جنبی برای روش BPR شامل خنک کننده گاز و واحد میعان قطران، جداسازی آمونیاک و سولفید هیدروژن از گاز کوره کک با در نظر گرفتن روش فرآوری غیرمستقیم با تخریب کاتالیزوری آمونیاک، بازیافت گوگرد خالص با در نظر گرفتن روش فرآیند (CLAUS)، جداسازی نفتالین، بازیافت بنزول خام و واحد تقطیر قطران و واحد عملیات فاضلاب فنولیک می‌باشد. خروج بخارها و گازها از منافذ مختلف مخازن و تانک‌های ذخیره سازی به منظور محدود کردن انتشار آنها در جو کنترل می‌گردد.

۱۷-۳-۱- مسائل مربوط به انتخاب فرآیند مناسب ککسازی

برای انتخاب فرآیند مناسب ککسازی، سه روش با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص پروژه تجزیه و تحلیل شده است. در تکنولوژی BPR، روش‌های شارژ فشرده (BPR-SC) Stamp charge و شارژ از بالا (BPR-TC) برای ارزیابی در نظر گرفته شده‌اند. در مورد تکنولوژی HR، کوره‌های پیشرفته HR به همراه تکنیک شارژ فشرده و بازیافت انرژی گرمایی گازهای داغ خروجی جهت تولید انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. گاز کوره کک، به عنوان محصول جانبی روش BPR، برای تولید انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مورد روش HR، انرژی الکتریکی از طریق بکارگیری گرمای گازهای داغ خروجی که مشخصه اصلی این تکنولوژی می‌باشد، تولید می‌گردد.

- مقایسه روش‌ها

هدف از مقایسه روش‌های ککسازی ارزیابی تکنولوژی‌های مختلف برای ظرفیت ویژه‌ای است که شامل ویژگی‌های خاص برای یک پروژه به خصوص می‌باشد. تکنولوژی‌های خاص ککسازی استفاده از تنوع بیشتر زغال کک با کیفیت پائین تر را در نسبت بالاتر ترکیب بدون کاهش کیفیت و خصوصیات مکانیکی کک را امکانپذیر می‌سازد. به منظور مقایسه تمامی روش‌ها، مطابق اصول فنی آورده می‌شوند و مقایسه بر اساس مزیت‌های نسبی با مشخص کردن هزینه تجهیزات، هزینه عملیاتی و هزینه تولید کک انجام می‌شود. معیارهای اصلی برای مقایسه دو روش به صورت ذیل آورده شده‌اند:

جدول ۱-۵- معیارهای اصلی برای مقایسه دو روش ککسازی.

BPR (SC & TC)	HR	
	مشابه در همه روش‌ها	جابجایی زغال و کک
شارژ از بالا برای SC شارژ فشرده برای TC	شارژ فشرده	شارژ زغال
برای استحصال قطران، آمونیاک، گوگرد و نفتالین نیاز می‌باشد.	نیاز نمی‌باشد، البته گوگردزدایی گاز دودکش نیاز می‌باشد.	واحد محصول جانبی

فاضلاب تولید شده از سایت تصفیه سیال خروجی تصفیه شده و این سیال خروجی تصفیه شده در خنک سازی کک مورد استفاده قرار می‌گیرد.	تولید نمی‌شود	فاضلاب فنولیک
گاز مازاد کوره کک برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود.	استفاده از گاز	
NORM های استاندارد برای همه روش‌ها در نظر گرفته شده است.	انتشار گاز	
مشابه برای همه روش‌ها	سطح اتوماسیون	

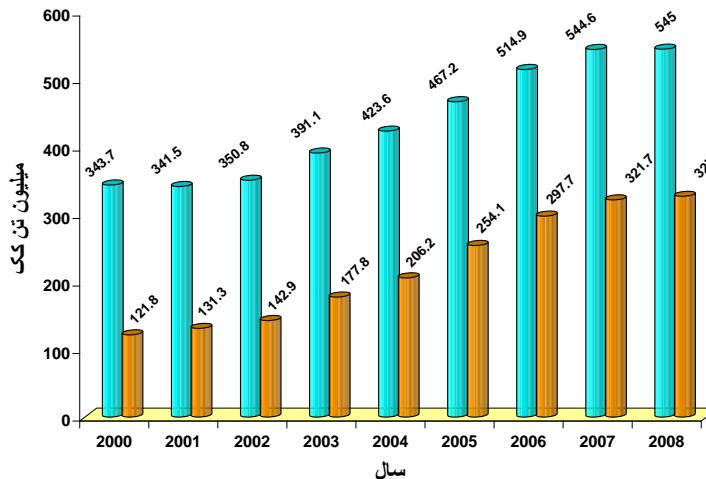
در مورد جدول فوق چند نکته قابل توجه است:

- ۱- در روش تولید کک با بازیابی انرژی، واحد محصول جانبی نیاز نمی‌باشد، در حالیکه در روش تولید کک با بازیافت مواد جنبی برای استحصال قطران، آمونیاک، گوگرد و نفتالین خطوط دیگری نیاز می‌باشد. با توجه به اینکه این مواد همگی به شدت آلوده‌کننده محیط زیست هستند و هریک از این خطوط جدید می‌تواند آلودگی جداگانه‌ای ایجاد نماید، انتخاب روش تولید کک با بازیابی انرژی از دیدگاه محیط زیستی بهتر است.
- ۲- در روش تولید کک با بازیافت انرژی فاضلاب فنولیک که از موارد آلوده کننده محیط زیست است تولید نمی‌شود در حالیکه در روش تولید کک با بازیافت مواد جنبی تولید شده و تمهیدات زیادی برای تصفیه آن نیاز می‌باشد.
- ۳- در مورد گاز خروجی کوره در روش تولید کک با بازیافت حرارتی، (به طور مثال) در پروژه ۲۵ مگاوات برق تولید می‌شود در حالیکه در روش تولید کک با بازیافت مواد جنبی فقط ۳ تا ۵ مگاوات برق تولید می‌شود.
- ۴- به صورت کلی روش بازیافت (TC , SC) نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتری دارد که با هزینه پائین‌تر کاری (عملیاتی) جبران شده است (مخصوصاً، برای روش SC که استفاده از زغال کک با کیفیت پائین‌تر را در نسبت بالاتر مجاز می‌کند)، البته به شرط آنکه اعتبار قابل توجهی از طریق بکارگیری مناسب گاز مازاد کوره کک اضافه گردد (به غیر از تولید انرژی الکتریکی).
- ۵- ناخالصی‌های موجود در گاز خالص کوره کک برای تولید انرژی الکتریکی با استفاده از روش‌های معمول مورد استفاده قرار می‌گیرد، در صورت استفاده از روش بازیافت مواد جنبی، محصولات جانبی از قبیل قطران، بنزول و گوگرد از گاز کک استحصال می‌گردد.

- مزایای فرایند تولید کک به روش بازیافت حرارت

کک ماده مهم و اصلی احیا و ذوب صنایع فولاد به شمار می‌آید. هم اکنون ۹۳۰ میلیون تن به روش کوره‌بلند (کنورتور اکسیژنی و زیمنس مارتین) تولید می‌شود. کک در حین بهره‌برداری بیش از ۵۰٪ حجم کوره بلند را اشغال می‌کند. میزان تولید کک جهان در سال ۲۰۰۸ بالغ بر ۵۴۵ میلیون تن به ثبت رسیده است. شایان ذکر است بیش از

که جهان معادل ۳۲۷ میلیون در کشور چین تولید شده است. میزان تجارت بین المللی که در حدود ۲۸ میلیون تن بوده است که ۲۲ میلیون تن توسط کشور چین صورت گرفته است. در **شکل ۲۲-۱** روند تولید که جهان و چین به نمایش درآمده است.



شکل ۲۲-۱ روند تولید که در جهان و چین.

با توجه به کاهش ذخایر زغال‌های ککشو در جهان، محققین در چالش جایگزینی که با تزریق پودر زغال از نوع غیرککشو در کوره‌بلند و استفاده از زغال غیرککش و آنتراسیت در فرایند شارژ قالبی تولید که به روش بازیافت حرارت قرار گرفته و به موفقیت‌های مهمی دست یافته‌اند. در **جدول ۶-۱** سهم کشورهای مختلف در تولید که جهان نشان داده شده است. با توجه به روند رو به افزایش باطری‌های ککسازی افقی با بازیافت حرارت به خصوص در کشورهای چین، هند، آمریکا، برزیل و ... مزایای روش مذکور در ادامه خلاصه گردیده است.

جدول ۶-۱- میزان تولید که در کشورهای مختلف جهان در سال ۲۰۰۸ (میلیون تن).

کشور	میلیون تن	کشور	میلیون تن
چین	۳۲۷/۰۰۰	قزاقستان	۲/۰۳۰
ژاپن	۳۸/۲۰۰	بلژیک	۱/۹۸۳
روسیه	۳۰/۲۵۹	مکزیک	۱/۹۶۷
هند	۲۱/۰۴۰	اسلوواکی	۱/۷۳۵
اوکراین	۱۸/۴۹۳	کلمبیا	۱/۵۱۵
آمریکا	۱۴/۲۴۱	مصر	۱/۴۰۰
کره جنوبی	۱۰/۶۱۴	اتریش	۱/۳۶۰
لهستان	۹/۸۳۲	سوئد	۱/۱۷۶
برزیل	۹/۳۴۹	رومانی	۱/۰۱۷
آلمان	۸/۲۶۰	مجارستان	۰/۹۹۰

۰/۹۰۰	آرژانتین	۴/۴۵۵	ایتالیا
۰/۸۷۰	ایران	۴/۴۲۲	فرانسه
۰/۸۶۰	فنلاند	۴/۱۶۶	انگلستان
۰/۸۱۶	بوسنی	۴/۰۱۰	تایوان
۰/۴۸۳	شیلی	۳/۶۰۰	ترکیه
۰/۴۴۳	الجزایر	۳/۲۰۶	جمهوری چک
۰/۳۰۰	بلغارستان	۳/۱۶۱	استرالیا
۰/۳۰۰	پاکستان	۲/۶۲۵	آفریقای جنوبی
۰/۲۰۰	ویتنام	۲/۸۲۴	کانادا
۰/۱۵۰	زیمباوه	۲/۴۰۰	اسپانیا
		۲/۱۶۶	هلند
۵۴۵/۰۲۶ میلیون تن			جمع کل

انعطاف در انتخاب نوع زغال (امکان استفاده از زغال‌های با مواد فرار بالا، پائین و آنتراسیت).

کیفیت بالای کک از نظر شاخصه CRI، M10 و CSR به دلیل طولانی بودن سیکل فرآیند ککسازی.

امکان استفاده از ریزه کک تا ۷٪ در مخلوط زغال.

ظرفیت شارژ سنگین کیک زغال تا ۵۰ تن.

ایجاد فشار منفی در درون سلول و جلوگیری از خروج مواد فرار زغال به اتمسفر.

بالا بودن ارزش افزوده محصولات نسبت به فرآیند مرسوم.

شرایط مطلوب محیط زیست (حذف SO_2 و گرد و غبار از گازهای خروجی ککسازی).

در امریکا سازمان محیط زیست فقط به فرآیند ککسازی با بازیافت حرارتی مجوز احداث صادر می‌کند.

کنترل بهتر فرآیند از نظر مکش، درجه حرارت و بالا بودن سطح اتوماسیون.

بازدهی بالای کک (٪ ۷۵-۷۷).

تولید بخار و برق به میزان ۱۰ مگاوات بازای هر ۱۰۰ هزار تن کک تولیدی در سال.

در صورت استفاده از سیستم CDQ برق تولیدی بیشتر خواهد شد.

ایمنی بالای تجهیزات و شرایط کار.

کیفیت بالای مصالح و ساخت و عمر طولانی واحد تا ۴۰ سال.

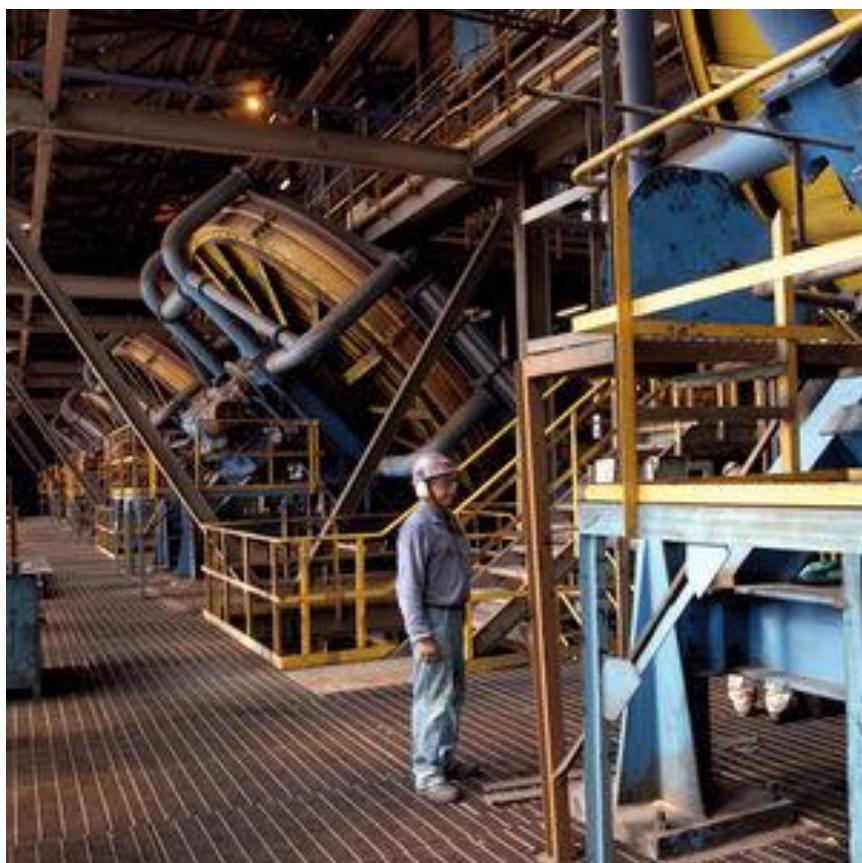
به کارگیری ۲۳ نوع آجر ساده بجای ۱۰۰۰ نوع آجر فرآیند مرسوم.

امکان استفاده از آجر آلومینایی بجای سیلیکایی.

پائین بودن تناز آجرهای نسوز مصرفی (یک سوم فرآیند مرسوم).

- پائین بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری.
- مساحت زمین لازم برای احداث واحد ککسازی کمتر از فرایند مرسوم است.
- مدت زمان احداث واحد کوتاه می‌باشد (۸ تا ۱۸ ماه).
- ادغام ماشین‌های بارگیری زغال، تخلیه کک و کوبش زغال امکان پذیر است.
- به جای ماشین در بازکن از سیستم زنجیر یا هیدرولیک استفاده می‌شود.
- استفاده از حرارت گازهای خروجی برای پائین آوردن رطوبت زغال.
- نیاز به نیروی انسانی کمی دارد.
- امکان توسعه واحدهای احداث شده و در حال بهره‌برداری.
- نبود شیب داخلی در طراحی سلول‌ها، عدم گرفتگی سلول را در حین تخلیه کک موجب می‌گردد.
- وجود فاصله بین کیک زغال و دیواره سلول از گرفتگی سلول جلوگیری می‌نماید.
- تعمیر سلول‌ها بدليل عریض بودن آن‌ها به سهولت انجام می‌پذیرد.
- درجه حرارت کک سازی در ۱۲۵۰-۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد حفظ می‌شود.
- در فرایند جدید کک سازی، امکان تولید کک در سلول‌های عمودی با شارژ قالبی وجود دارد.
- مصرف ویژه برق در کک سازی پائین است (۱۵ کیلو وات ساعت برتن).
- در آمریکا، ظرفیت نصب شده ککسازی‌های با بازیافت حرارتی ۴/۷۵ میلیون تن است و ۱/۲ میلیون تن نیز در حال احداث می‌باشد. شرکت سان کک آمریکا در سال ۲۰۰۸ با فرآیند بازیافت حرارتی ۳/۵۶ میلیون تن کک تولید کرده است.

فرآیند تولید گندله



۲- فرآیند تولید گندله

۱-۲- مقدمه‌ای بر گندله

گندله یعنی گلوله‌های تولید شده از نرمه سنگ آهن و سایر مواد افروزنی که نخست خام و سپس پخته شده و سخت می‌شود، و برای احیا به روش سنتی تولید آهن در کوره بلند و یا روش‌های متعدد احیای مستقیم به کار می‌رود. از آنجایی که کنسانتره که محصول کارخانه کانه‌آرائی است به صورت کانه‌های آهن دانه‌ریزی می‌باشد که به این شکل فیزیکی قابل مصرف نیستند و این نرمه‌ها، تراوایی گاز را در بار کوره بلند به صورت ناموزون کاهش می‌دهند و عملکرد کوره بلند را مختل می‌کنند و همین طور در کارخانه احیا مستقیم نیز اشکالاتی را ایجاد می‌نمایند، بنابراین نرمه‌های آهن را به صورت گندله در می‌آورند که به عنوان فرآورده میانی از معدن تا کوره‌های تولید آهن و فولاد در نظر گرفته می‌شود [۱]. از آنجاییکه گندله‌ها ماده اولیه به شمار می‌آیند، لذا باید در کوره‌های احیا ویژگی مکانیکی، شیمیایی و حرارتی مطلوبی را داشته باشند. گندله‌ها، گویهایی تولید شده از کنسانتره‌ها و کانه‌های طبیعی آهن هستند که دارای ترکیبات کانی‌شناختی و شیمیایی متفاوت می‌باشند. درواقع هدف واحد گندله‌سازی تبدیل کنسانتره آهن به گندله آهنه با هندسه و تخلخل یکنواخت است.

گندله‌ها دارای خواص زیر هستند:

- توزیع یکنواخت ابعاد به طور عمدۀ از ۹ تا ۱۶ میلیمتر،
- تخلخل زیاد و یکنواخت ۲۵ تا ۳۰ درصد،
- ترکیب کانی‌شناختی یکنواخت به شکل هماتیت یا ترکیبات هماتیت‌دار احیا شونده،
- استحکام مکانیکی زیاد و یکنواخت،
- مقاومت به سایش،
- استحکام مکانیکی کافی حتی در برابر تنفس گرمایی در محیط‌های احیا کننده،
- قابلیت چسبندگی کم.

اجزا سیستم گندله‌سازی عبارتند از:

- سیستم انتقال مواد خام،
- سیستم آسیاکنی و خردایش مواد اولیه،
- واحد مخلوط سازی مواد اولیه،

- تولید گندله خام،
- کوره پخت گندله،
- سیستم غبارگیر،
- سیستم تامین آب خنک کننده،
- سیستم انتقال محصول نهایی،
- سیستم تصفیه آب،
- سیستم تولید هوا فشرده،
- آزمایشگاه.

پس از تولید گندله خام عملیات سخت گردانی بر روی آن انجام می‌گیرد. عملیات سخت گردانی شامل مراحل خشک کردن، پیشگرم کردن و پخت است. مرحله پیشگرم در ادامه مرحله خشک شدن به طور پیوسته از ۳۲۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در خلال پیشگرم کردن، واکنش‌های مختلفی مثل تبخیر آب تبلور، تجزیه هیدرات‌ها، کربنات‌ها، سولفات‌ها، تشویه گوگرد موجود در سولفیدها و تبدیل اکسیدهای آهن موجود و عمدتاً اکسایش مگنتیت به هماتیت به شکل موازی و متوالی رخ می‌دهد که تابع ترکیب شیمیایی مواد اولیه است. سرعت فرآیند پیشگرم بیشتر به اکسایش مگنتیت وابسته است. در سخت کردن گندلهای مگنتیتی زمان پیشگرم شدن طولانی‌تر و زمان پخت کوتاه‌تر می‌باشد. اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت واکنشی به شدت گرم‌ماز است.



در عملیات گرمادهی مگنتیت در محیط اکسیدکننده سه مرحله اصلی مشاهده می‌شود. در مرحله اول اکسیداسیون در دمای پائین و زیر ۴۰۰°C انجام می‌شود، بعد از آن مرحله دوم اکسیداسیون شروع و در دمای بین ۹۰۰°C و ۱۱۰۰°C کامل می‌شود. مرحله سوم زمانی شروع می‌شود که تجزیه هماتیت به مگنتیت صورت می‌گیرد. در ضمن فرآیند اکسیداسیون، سوزن‌های هماتیت با نفوذ یون‌های Fe^{+2} و Fe^{+3} در فاز مگنتیت تشکیل می‌گردد و سرعت نفوذ با تغییر در مقدار نابجایی‌ها و ناخالصی‌ها و جاهای خالی تغییر می‌کند. به طور کلی خواص کانی مگنتیت بر روی آن تاثیر می‌گذارد. اکسیداسیون دمای بالا برای ذرات کنسانتره مگنتیت گندله شده با حالت پودری آن تفاوت بسیاری دارد. چون در گندله ذرات مگنتیت در تماس نزدیک با بنتونیت و مواد افزودنی هستند. در گندله، تخلخل بر سرعت نفوذ اکسیژن موثر است و سرعت اکسیداسیون با زینتر شدن و تشکیل سرباره، به دلیل کاهش تخلخل، کاهش می‌یابد. اکسیداسیون مگنتیت در گندله به چندین دلیل بسیار مهم است. آزاد شدن انرژی اکسیداسیون در محاسبه مقدار انرژی کل مورد نیاز برای فرآیند گندله‌سازی اهمیت فراوانی دارد. اکسیداسیون مگنتیت پیوند قوی بین ذرات ایجاد می‌کند و این امر موجب استحکام بیشتر و تولید غبار کمتر در کوره

می شود. مقدار اکسیداسیون ثابت بر روی پایداری فرآیند تولید گندله تاثیر بسیاری دارد. تغییر در مقدار اکسیداسیون گندله بدست آمده از مرحله پیش گرم باعث ایجاد نوسان در مقدار اکسیداسیون مورد نیاز در مراحل بعدی می شود که این امر ضرورت تغییر در آماده سازی هوا با دمای مناسب را باعث می شود. الگوی اکسیداسیون و پیشینه حرارتی گندله مگنتیتی بر خواص گندله نهایی تاثیر گذار می باشد. اگر فرآیند اعمال حرارت به طور مناسبی صورت نگیرد، گندله دارای ساختار دو لایه ای می گردد که در این ساختار هسته به شدت زینتر شده و لایه خارجی کمتر زینتر می شود و حالت جدایش بین دو لایه پدید می آید. لایه خارجی قبل از رسیدن به دمای زینتر، اکسید می شود و گرمای حاصل دمای مرکز را به دمای زینتر می رساند. این حالت بیشتر در اکسیداسیون در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد دیده شده است. یکی از راه حل های جلوگیری از ایجاد ساختار دو لایه ای انجام اکسیداسیون کامل قبل از شروع زینتر می باشد که به آن پخت دوتایی گفته می شود. مقدار اکسیداسیون قابل قبول بعد از مرحله پیش گرم به منظور رسیدن به استحکام مناسب پس از پخت، ۸۰ درصد پیشنهاد شده است. تغليظ کردن گاز اکسید کننده در مرحله پیش گرم تا حدود ۳۰ درصد اکسیژن و کنترل سرعت افزایش دما جهت بهبود خواص گندله پیشنهاد شده است.

حقوقان مختلفی تحقیقات جامع بر روی مکانیسم اکسیداسیون گندله مگنتیتی در اوایل ۱۹۷۰ میلادی انجام دادند. موضوعات بررسی شده تاثیر فشار جزیی اکسیژن، تخلخل گندله، اندازه گندله، مقدار ریزی کنسانتره مگنتیتی بر روی اکسیداسیون گندله می باشد. اکسیداسیون لایه خارجی گندله به سرعت انجام می گیرد و با سرعت واکنش شیمیایی کنترل می گردد. بعد از اکسیداسیون سریع لایه خارجی، اکسیداسیون با نفوذ اکسیژن از لایه هماتیتی تشکیل شده کنترل می گردد. زمان مورد نیاز برای اکسیداسیون به فشار اکسیژن که عامل محرك نفوذ است، وابستگی زیادی دارد. نشان داده شده است که زمان مورد نیاز برای رسیدن به مقدار مشخصی از اکسیداسیون، با مربع قطر گندله رابطه مستقیم دارد، به طوری که اگر اندازه قطر گندله ای دو برابر شود زمان مورد نیاز برای رسیدن به درجه اکسیداسیون مشخص، چهار برابر حالت قبل می گردد. محققین دیگری به منظور بررسی تاثیر مقدار خردایش بر اکسیداسیون و استحکام گندله بر روی یک نوع کنسانتره با دو روش خردایش متفاوت مطالعاتی انجام دادند. در این مطالعات گندله خام با استفاده از دیسک گندله ساز آزمایشگاهی بدست آمد. گندله ها در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ساعت خشک شدند، مرحله پیشگرم، پخت و سرد کردن در مناطق مختلف کوره تیوبی انجام شد. مرحله پیشگرم در دماهای بین ۶۵۰-۹۵۰ و بین زمان ۸ تا ۱۷ دقیقه انجام شد. با انجام محاسبات ریاضی مقدار انرژی فعال سازی برای میزان خردایش کمتر KJ/mol ۴۹/۶۲ و برای خردایش بیشتر ۳۳/۸۴ KJ/mol بدست آوردند. علت کم شدن مقدار انرژی فعال سازی برای خردایش بیشتر انجام فعال سازی مکانوشیمیایی در خردایش بیشتر می توان دانست. با توجه به گستردگی شدن دایره مصرف فولاد با پیشرفت تکنولوژی و تنوع موارد استفاده آن، تولید فولاد نیز همگام با پیشرفت تکنولوژی تغییرات بسیاری داشته است، که در پی این تغییرات تولید کنندگان سعی در

بهبود بهرهوری و استفاده از انرژی و سوختهای ارزان‌تر با توجه به محیط جغرافیایی خود کرده‌اند. امروزه فن‌آوری‌های مورد استفاده در تولید محصولات فولادی در مراحل بعد از به دست آوردن فولاد مذاب یعنی ریخته‌گری و نورد، کم و بیش یکسان است. اما برای به دست آوردن فولاد مذاب یا خام، از فن‌آوری‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد.

۲-۲- آهن اسفنجی

آهن اسفنجی که از احیای مستقیم سنگ‌آهن به دست می‌آید DRI نامیده می‌شود و درصد آهن آن بین ۸۴ تا ۹۵ درصد است. احیا موجب حذف اکسیژن در سنگ‌آهن شده و سنگ را به صورت شانه عسل یا ساختار متخلخل اسفنجی شکلی در می‌آورد که بهمین دلیل بدان آهن اسفنجی می‌گویند. معمولاً آن را به شکل کلوخه یا گندله‌ای شکل نیز تولید می‌کنند و علاوه بر این به صورت فشرده و بریکت شده نیز تولید می‌شود که بدان (HBI) آهن بریکت شده گرم) می‌گویند که معمولاً از طریق فشرده کردن DRI در درجه حرارت حدوداً ۶۵۰ درجه سانتیگراد به وجود می‌آید. HBI شکل تغليظ شده و فشرده DRI است که برای انبار کردن و حمل و نقل آسان طراحی شده است. محصول DRI را می‌توان در کارخانه‌ها و واحدهای فولادسازی که در آنجا احیا در واحدهای احیا در کنار واحدهای فولادسازی صورت می‌پذیرد استفاده کرد. محصول DRI در جهان یک ماده شارژ کاملاً خالص و مرغوب محسوب می‌شود. در مقایسه با قراضه، مزایای استفاده از HBI/DRI یکپارچگی بیشتر آن در ترکیب، عناصر مضر کمتر (به خاطر ماهیت متخلخل آن) و مشکلات کمتر زیستمحیطی آن است. آهن اسفنجی با استفاده از زغال (غیرککشو) از طریق فرآیند احیای سنگ‌آهن در کوره دور تولید می‌شود. احیا در یک درجه حرارت از پیش تعیین شده و فشار اتمسفری کنترل شده صورت می‌پذیرد [۳].

مهمنترین مواد اولیه لازم برای تولید آهن اسفنجی اکسیدهایی به شکل کلوخه سنگ‌آهن/گندله، زغال(با خواص واکنشی بالا) و مواد گدازنده مانند آهک و دولومیت هستند. مواد اولیه ورودی مانند سنگ‌آهن، زغال (با خاصیت واکنشی بالا) و مواد گدازنده مانند سنگ آهک و دولومیت در اندازه‌های کالیبره شده به کمک تغذیه‌کننده‌های وزنی و حجمی به داخل کوره دور تغذیه می‌شوند. به دلیل شیب و حرکت چرخشی کوره دور مواد اولیه به آهستگی از انتهای دستگاه تغذیه به انتهای محل تخلیه یا شارژ حرکت می‌کند. در طی حرکت سنگ‌آهن به همراه زغال که قبل از گرم شده است به DRI تبدیل می‌شود. سپس مواد مستقیم به خنک‌کننده دور تخلیه شده و در آنجا خنک می‌شود. درجه حرارت محصول خنک شده در حدود ۸۰ درجه سانتیگراد بوده که از خنک‌کننده تخلیه شده و سپس به سیستم جداسازی و جابه‌جایی برده می‌شود. در تعیین مشخصه‌های اکسیدآهن مانند میزان فسفر و ضریب اطمینان آن از نظر سهولت احیا، باید احتیاط و دقت لازم به عمل آید. با استفاده از گندله با خلوص بالا و میزان فسفر پایین با یک قیمت اقتصادی می‌توان به تولید اقتصادی آهن اسفنجی نیز دست یافت. این محصول که شامل

آهن اسفنجی با مواد غیرمغناطیسی مانند زغال و غیره است توسط غربال به اندازه‌های مختلف جدا شده و سپس به طور مغناطیسی توسط جداکننده مغناطیسی جدا می‌شود. سپس آهن اسفنجی به یک مخزن ریخته شده و بیرون فرستاده می‌شود.

۲-۱-۲-۲- فرآیندهای مختلف تولید آهن اسفنجی

فرآیندهای احیای مستقیم را می‌توان به روشهای زغال غیرککش (مانند فرآیندهای کوره دوار و بوته دوار) و روشهای از گاز طبیعی (مانند کوره شافتی، فرآیندهای کوره‌ای با بستر مذاب) استفاده می‌کنند، تقسیم‌بندی کرد.

تعدادی از فرآیندهای DRI که در حال حاضر استفاده می‌شوند به شرح زیر است:

- فرآیندهای زغالی با استفاده از کوره‌های دوار OSIL ، SIIL ، TDR ، DRC ، Accar ، Codir ، SL/RN و Jindal
- فرآیندهای زغالی با استفاده از کوره‌های بوته‌ای دوار Sidcomet ، Cicofer ، Fastmet ، Immeto
- فرآیند نوع گازی که از retorts استفاده می‌کنند HYL1
- فرآیندهای پیوسته در یک کوره شافتی با استفاده از گاز طبیعی به عنوان یک احیاکننده: میدرکس و HYLIII
- فرآیندهای گازی با استفاده از بستر مذاب Circored و Finmet ، FIOR
- فرآیندهای مخصوص برای تصفیه اکسیدهای باطله مانند PRIMUS با استفاده از یک کوره چند بوته‌ای [۴].

۲-۲-۲- مزایای استفاده از آهن اسفنجی به جای قراضه

آهن اسفنجی جایگزین بهتری برای قراضه در واحدهای فولادسازی EAF/IF است، چون ماهیت هموژن بودن آن، باعث بهره‌وری مطلوب و مصرف کمتر کک است.

آهن اسفنجی را می‌توان جایگزین قراضه فولادی در کنورتور LD کرد.
دارای عناصر مضر یا زائد مانند مس، روی، قلع، کرومیوم، تنگستن، مولیبدنیوم و غیره که معمولاً در قراضه فولاد موجود است، نیست.

آهن اسفنجی دارای سولفور و گوگرد کمتری است.
فرآیند DRI دارای توانایی استفاده از زغال نامرغوب با خواص واکنشی خوب است که برای فولادسازی سنتی غیرقابل قبول است.
استفاده از DRI امکان مصرف قراضه نامرغوب به عنوان بخشی از مواد شارژی در فولادسازی الکتریکی بدون تاثیر بر کیفیت فولاد را میسر می‌سازد.

- به دلیل ترکیب مشخص آن، استفاده از DRI/HBI امکان پیش‌بینی دقیق از آمالیز نهایی از ابتدای تغذیه مستمر آهن اسفنجی وجود دارد.

- به دلیل اندازه یکنواخت DRI به بهره‌وری افزوده می‌شود. آهن موجود به صورت اکسید در آهن اسفنجی با حمام کربن واکنش نشان داده که منتهی به تاثیر جوشش شدید شده و موجب انتقال بهتر گرما و شتاب واکنش سرباره/فلز در طی فولادسازی می‌شود. به همین دلیل همگونی حمام بهبود یافته و منتهی به هیدروژن و نیتروژن کمتری در فولاد می‌شود [۵].

روش مرسوم تولید فولاد شامل کارخانه‌های گندله/سینتره‌سازی، اجاق‌ها، کوره‌بلند و کوره اکسیژنی پایه می‌باشد. بیش از ۷۰ درصد از تولید آهن دنیا از طریق کوره بلند است. چنین کارخانه‌هایی نیازمند هزینه‌های سرمایه‌ای سنگین و مواد خامی با شرایط خاص می‌باشند. در کنار آن اجاق کک و کارخانه سینتره که از ملزمات چنین کارخانه فولادی هستند به شدت آلوده کننده محیط زیست هستند. از سوی دیگر نصب سیستم‌های گران و پیچیده کنترل آلودگی مشکلات سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهند [۶].

دلایل نیاز به تکنولوژی‌های جایگزین تولید آهن در ادامه آورده شده است.

- گران و کمیاب بودن زغال ککشو،
- امکان استفاده از نرمه سنگ آهن بصورت مستقیم،
- محدودیت اراضی،
- مسائل زیست محیطی (حذف فرآیندهای آلاینده سینتره‌سازی و ککسازی)،
- کمبود آب،
- مقیاس اقتصادی بالای فرآیندهای فعلی (هزینه سرمایه‌گذاری بالا) [۷].

با در نظر گرفتن معضلاتی که ذکر گردید، فرآیندی جدید که بعنوان فرآیند احیای مستقیم آهن (DRI) شناخته می‌شود جهت تولید آهن توسعه داده شده است. این فرآیند بطور گسترده‌ای در نزد تقریباً تمامی کشورهای توسعه یافته مقبولیت یافته است. تولید قراضه در قیاس با مقدار مورد نیاز آن در صنعت فولاد بسیار پایین است و همچنین دریافت شده است که فولاد تولید شده از طریق فرآیند بازیافت دارای صرفه اقتصادی بیشتری نسبت به تولید آن از طریق فرآیند کوره بلند-کوره اکسیژنی است. کوره دوار تولیدکننده DRI با استفاده از زغال، برای تولید آهن اسفنجی با کیفیت و قابلیت تولید بالاتر (BF-BOF) است. بکار گرفته می‌شود که نیازمند عملیات دقیق‌تر در طی فرآیند می‌باشد [۶].

راه حل‌های جایگزین ممکن برای تولید آهن عبارتند از:

۱) تولید آهن غیر مایع: آهن احیای مستقیم (DRI) بعنوان جایگزینی مناسب برای آهن قراضه در کوره‌های الکتریکی، شامل فرآیندهایی نظیر SL/RN، میدرکس، ITmk3 وغیره،

۲) روش جایگزین برای آهن مایع (فلز داغ): فرآیندهای احیای ذوبی (SR) نظیر Hismelt، FINEX، COREX وغیره که از زغال غیر ککشو استفاده نموده و نیاز به سیستم‌های اجاق کک و کارخانه سینتره را مرتفع می‌سازد. به اراضی کمتری نیاز داشته، می‌توان از نرمه‌های سنگ‌آهن بطور مستقیم استفاده نمود (بجز فرآیند COREX) و کمتر آلاینده هستند [۷].

۳-۲- روش‌های تولید فولاد خام

روشهای اصلی تولید فولاد در دنیا بطور کلی به دو دسته زیر تقسیم می‌شود:

۳-۲-۱- Integrated Mill

در این روش ماده اولیه سنگ معدن آهن (اکسید آهن) می‌باشد که اکسید آهن در فرآیند آهن‌سازی و با استفاده از بک ماده احیا کننده، احیاء شده و به آهن تبدیل می‌شود. پس از آن در فرآیند فولادسازی با افزودن کربن و سایر افزودنیهای ضروری، آهن به فولاد تبدیل می‌گردد [۱]. روش Integrated Mill به دو تکنولوژی ذیل تقسیم می‌گردد:

۳-۲-۱-۱- کوره بلند

در این روش، از کوره بلند (Blast Furnace) در تولید آهن با استفاده از ماده احیا کننده کک و از کوره‌های اکسیژنی (BOF) جهت تولید فولاد از آهن استفاده می‌گردد. این تکنولوژی مهمترین شیوه تولید فولاد خام در جهان به شمار می‌آید و حدود ۷۰ درصد فولاد خام دنیا به این روش تولید می‌شود. در کشورمان کارخانه ذوب آهن اصفهان از این تکنولوژی استفاده می‌کند. کاهش منابع و معادن سنگ آهن غنی و کک که از زغالسنگ به دست می‌آید و لزوم سرمایه‌گذاری سنگین در بخش‌های ککسازی، اگلومراسیون و جمع‌آوری سرباره باعث گردید تا روش‌های دیگری غیر از کوره بلند نیز برای تولید فولاد، مورد تحقیق و بررسی قرار گیرند [۱].

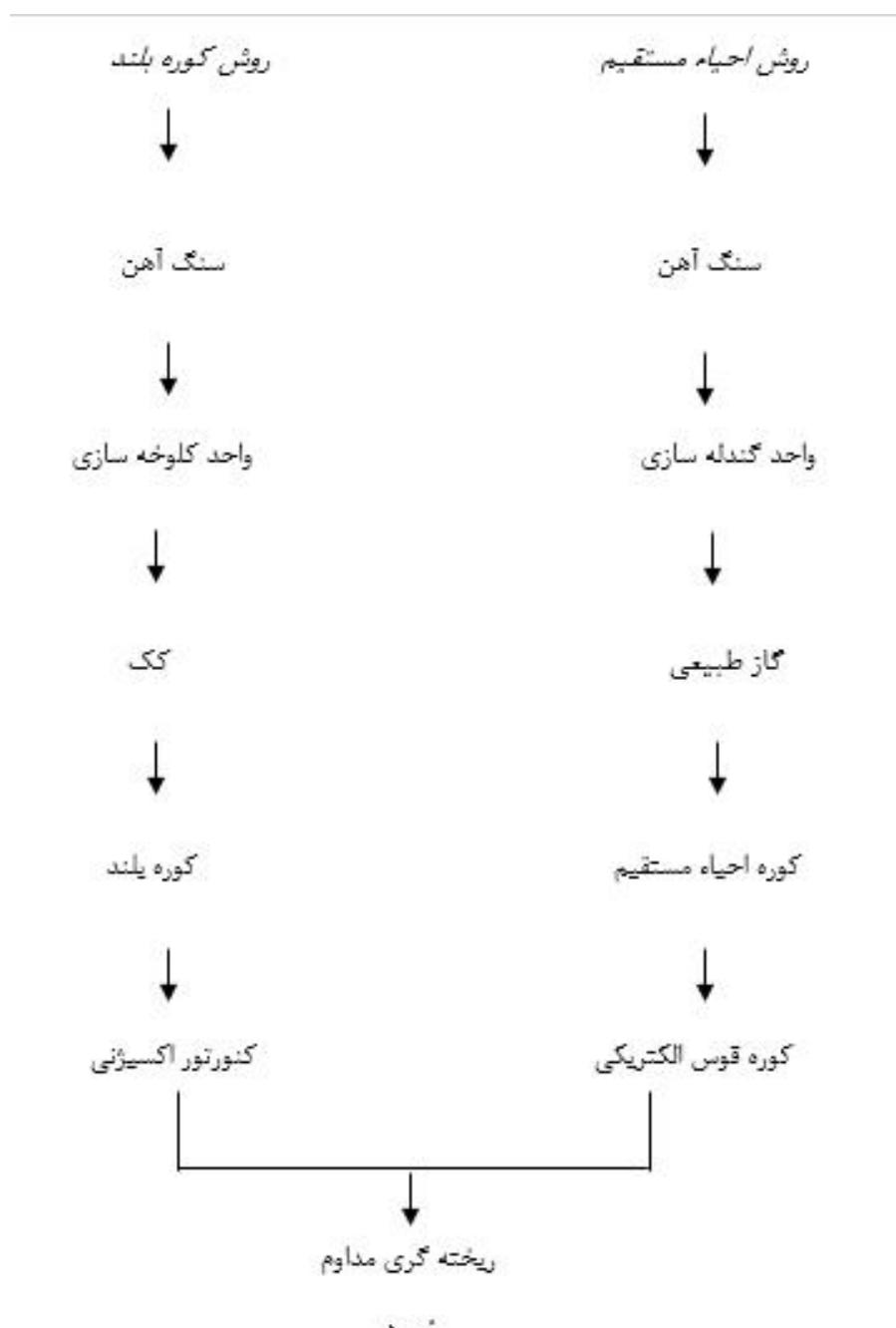
۳-۲-۱-۲- احیای مستقیم

تکنولوژی دیگر تولید فولاد روش احیای مستقیم می‌باشد. در این روش گاز طبیعی (CH_4) عامل احیای سنگ معدن آهن است و در کشورهایی با منابع غنی گاز طبیعی مانند ایران مورد توجه می‌باشد. سهم فولاد خام تولیدی از این روش در دنیا در حدود ۷٪ است. تکنولوژی احیای مستقیم به چند تکنولوژی عمده تقسیم می‌شود که مهمترین آنها عبارتند از MIDREX و Fluid Bed IV و HYL III و HYL IV که رایج ترین آنها، تکنولوژی MIDREX می‌باشد. تاکنون تعداد ۲۶ واحد

MIDREX در دنیا نصب و راه اندازی شده است که ۲ واحد آن در مجتمع‌های فولاد مبارکه و فولاد خوزستان در کشور فار

.[۲] دارد

نمایی از تولید فولاد به روش احیای مستقیم و روش کوره بلند را به صورت زیر می‌توان ارائه کرد.



شکل ۱-۲- نمایی شماتیک از تولید فولاد به روش کوره بلند و احیای مستقیم.

- اصولاً هر مجتمع فولاد با روش کوره بلند بطور کلی از واحدهای انباشت و برداشت سنگ آهن، زغال سنگ و آهک، ککسازی، اگلومراسیون، آهک پزی، کوره بلند، کارگاه تهیه اکسیژن، کنورتور، ریخته گری (مداوم یا غیر مداوم) و نورد تشکیل می شود. ضمناً برای اینکه این مجموعه بتواند کار کند، سیستم های توزیع برق، توزیع آب، توزیع سیالات و احتمالاً نیروگاه داخلی نیز می باشند.

- در یک مجتمع فولاد با روش احیای مستقیم، واحدهای انباشت و برداشت، فاقد انباشت و برداشت زغال سنگ بوده و بالطبع واحد ککسازی نیز وجود ندارد و به جای واحد اگلومراسیون، واحد گندله سازی و به جای کوره بلند و کنورتور، کوره احیای مستقیم و ذوب الکتریکی وجود دارد. واحدهای ریخته گری و نورد تفاوتی ندارند و سایر قسمت های مجتمع در اصل مانند روش کوره بلند می باشد. در کوره های احیای مستقیم، سنگ آهن به جای آنکه مانند کوره بلند با کک احیا شده و بصورت چدن مذاب خارج گردد، به کمک گاز احیایی که از شکستن گاز طبیعی بدست می آید، بدون ذوب شدن احیا شده و به صورت گلوله های متخلخل و به نام آهن اسفنجی خارج می شود. آهن اسفنجی سپس در کوره های الکتریکی که در این روش قسمتی از کار کوره بلند و کنورتور را انجام می دهد، ذوب و تصفیه شده و فولاد دلخواه را تولید می کند [۲].

با افزایش تولید جهانی فولاد و محدودیت در تأمین منابع قراضه (بیش بینی کاهش و وجود عناصر زاید در قراضه) فولادسازان در پی توسعه فرآیندها و امکان استفاده از شارژ فلزی هستند که در عملیات فولادسازی مصرف قراضه را کاهش دهد. مواد شارژ فلزی شامل قراضه، آهن اسفنجی یا بریکت و چدن هستند. در حال حاضر درصد مصرف آهن اسفنجی نسبت به قراضه بسیار افزایش داشته است. فولادسازان گذشته از مشکلات مربوط به تأمین قراضه و همچنین افزایش قیمت آن به دلایل فنی ترجیح می دهند از آهن اسفنجی استفاده کنند. عیار سنگ آهن عامل اصلی در ارزش آن است و عیار پایه برای سنگ آهن های مورد مصرف در کوره بلند ۵۱/۵ درصد و در مورد کنسانترهای احیای مستقیم حدود ۶۷ درصد است.

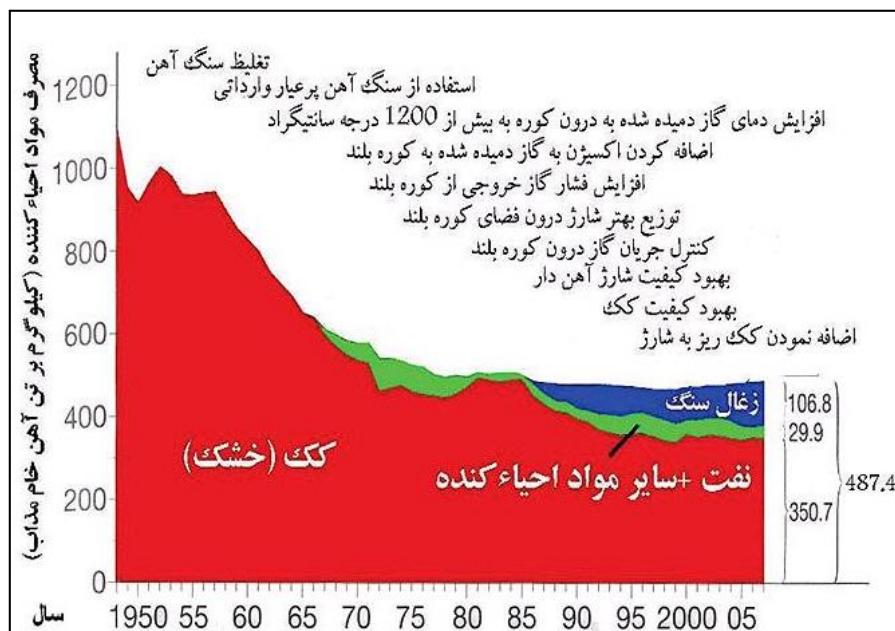
Mini Mill (Scrap – Base) - ۲-۳-۲

در این روش، ماده اولیه قراضه های آهن و فولاد است که پس از ذوب در کوره های قوس الکتریکی، حذف ناخالصیها، افزودن کربن و سایر مواد ضروری به فولاد تبدیل می گردد [۱].

۴-۲- گندله‌سازی و کاربردهای آن

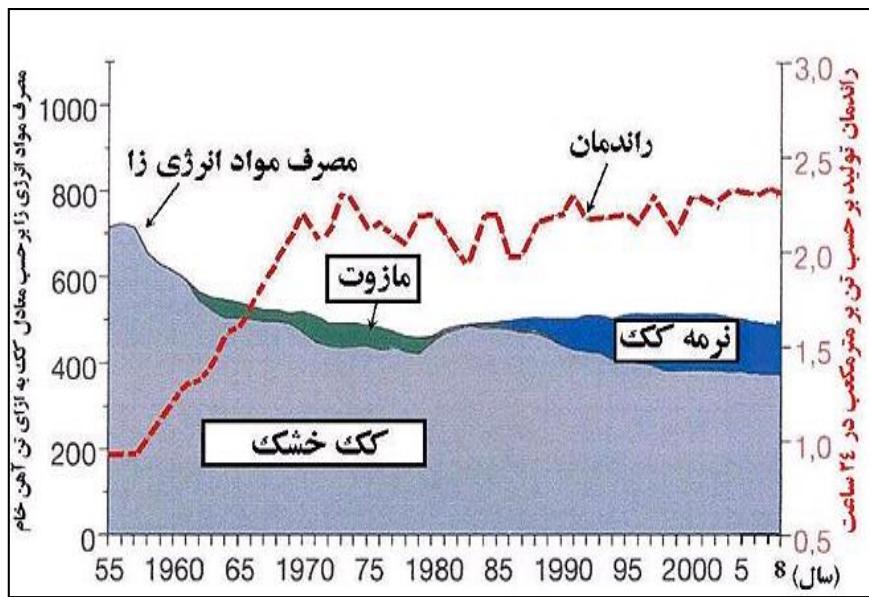
تولید فولاد در سطح جهان هر ساله حدود ۶ درصد انرژی مصرفی دنیا را به خود اختصاص می‌دهد. از صد سال قبل تاکنون متخصصان کوشش کرده و می‌کنند تا مصرف انرژی به ازای تن تولید فولاد از مواد آهن‌دار طبیعی را کاهش دهند.

شکل‌های ۲-۲ و ۳-۲ روند کاهش مصرف انرژی به ازای تن تولید آهن خام مذاب ژاپن و آلمان را در سال‌های مختلف نشان می‌دهند. متخصصان از ۱۰۰ سال قبل دریافت‌های بودند که هرچه عیار آهن مواد آهن‌دار بیشتر باشد اولاً مصرف انرژی به ازای تن تولید فولاد کاهش یافته، ثانیاً تولید سرباره به ازای تن تولید فولاد کاهش یافته و ثالثاً راندمان تولید افزایش خواهد یافت.



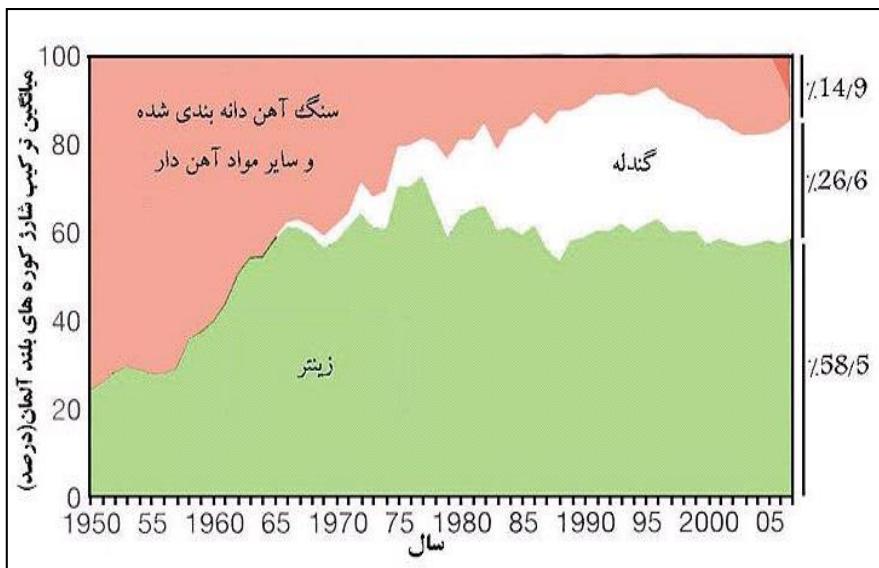
شکل ۲-۲- روند تغییر میانگین مصرف مواد احیا کننده در کوره‌های بلند آلمان [۵].

- با گذر زمان میزان مصرف انرژی (بر حسب وزن کک) به ازای هر تن فولاد از ۱۰۰۰ کیلوگرم به ۵۰۰ کیلوگرم کاهش یافته است.
- در گذشته تنها عامل احیا کننده آکسید آهن کک بوده است که از دهه ۷۰ میلادی به بعد سایر عامل‌های احیا کننده نیز مورد استفاده قرار گرفته اند و با گذر زمان سهم آنها افزایش یافته است. ولی هنوز هم عامل اصلی احیا کننده کانی‌های آکسید آهن کک است.



شکل ۲-۳- میانگین میزان مصرف مواد انرژی‌زا و میانگین راندمان کوره‌های بلند ژاپن [۶].

از طرفی عیار آهن در مواد طبیعی آهن دار در سطح جهان عمدهاً کمتر از ۶۰ درصد است [۷]. متخصصان برای افزایش عیار آهن به تدریج با نوآوری در تکنولوژی تغليظ توانستند امروزه کنسانترهای تولید کنند که عیار آهن آن حدود ۷۱ درصد باشد [۸]. جهت افزایش عیار آهن باید مواد همراه سنگ‌آهن را پس از استخراج از آن جدا کرد. برای افزایش بهینه عیار آهن به اجبار باید سنگ‌آهن استخراج شده را خرد کرد. بدون خردایش بهینه مواد آهن دار استخراج شده از معادن نمی‌توان به عیار ایده‌آل در کنسانتره تولیدی رسید. مصرف کنسانتره سنگ‌آهن با دانه‌بندی کمتر از ۱۰ میلیمتر به سادگی در کوره بلند امکان‌پذیر نیست. متخصصان متالورژی توانستند از سال ۱۹۱۹ به تدریج نسبت به تکامل نسبی تکنولوژی تولید زینتر (کلوخه) اقدام کنند. افزایش ظرفیت جهانی تولید زینتر و گسترش آن با افزایش تولید فولاد در سطح جهان همراه بود. تا ۶۰ سال قبل زینتر درصد کمی از بار کوره‌های بلند آلمان را تشکیل می‌داد و حدود ۷۵ درصد بار کوره‌های بلند آلمان را سنگ دانه‌بندی شده با عیار پایین را تشکیل می‌دادند. **شکل ۴-۲** میانگین اجزای متشكله مواد آهن دار کوره‌های بلند آلمان در ۶۰ سال اخیر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- اجزای متشكله مواد آهن داری که در کوره های بلند آلمان در سال های مختلف مصرف کردند [۹].

با گسترش روش های احیای مواد آهن دار در خارج از کوره بلند نقش عیار مواد آهن داری که از آنها آهن اسفنجی تولید می شود و آهن اسفنجی تولیدی را عمدتاً در کوره های قوس الکتریکی به فولاد تبدیل می کنند، بیش از پیش آشکار شد [۶]. با توجه به اینکه در فرآیند تولید زینتر با تمام کوششی که متخصصان به عمل آوردند، باز هم تولید زینتر سبب آلودگی محیط زیست می شود متخصصان متالورژی از سال ۱۹۶۵ برای تولید قطعات بزرگتر از نرمه سنگ آهن به جز استفاده در فرآیند تولید زینتر به ابداع روش دیگری پرداختند. این روش آماده سازی به کنسانترهای با دانه بندی بسیار ریز یعنی در حدود ۶۰ میکرون بر حسب نوع سنگ آهن نیاز دارد. در صورتی که اجزای متشكله مواد آهن داری که برای تولید زینتر استفاده می شوند باید بزرگتر از یک میلیمتر باشند. یعنی تا تکامل نسبی فرآیند تولید گندله امکان خردایش بهینه برای افزایش نزدیک به مرز تئوری (۷۱ درصد) عیار کنسانتره در سنگ آهن وجود نداشت. ماده اولیه برای تولید زینتر حداقل باید یک میلیمتر باشد در حالیکه برای رساندن عیار آهن به حداقل لازم نیاز به فرآیند پر عیار سازی است که با فرآیند خردایش تا ۶۰ میکرون شروع می شود. بنابراین این کنسانتره مناسب فرآیند زینتر سازی نیست. به همین دلیل فرآیند گندله سازی در حال جایگزینی است.

لذا با افزایش تولید جهانی فولاد در ۳۰ سال اخیر تولید گندله در جهان به تدریج افزایش یافت. میانگین میزان تولید سالانه گندله در ۵ سال در سطح دنیا حدود ۴۰۰ میلیون تن است [۱۱]. تکامل نسبی فرآیند آماده سازی بهینه کنسانتره آهن (گندله سازی) سبب بالا رفتن ارزش افزوده مواد معدنی آهن دار شد. با توجه به محسنات فنی و اقتصادی تولید گندله نسبت به تولید زینتر عملاً در ۲۰ سال اخیر کمتر واحد جدید تولید زینتر در کشورهای اروپایی و صنعتی غرب حتی بجای واحد های قبلی تولید زینتر که باید از رده تولید خارج شوند ساخته نشده است. زیرا محدودیتی که از لحاظ فنی برای استفاده از کنسانتره با دانه بندی زیر یک میلیمتر جهت تولید زینتر وجود دارد عملاً تا گسترش تولید گندله عیار کنسانتره های آهنی که به زینتر

تبديل می‌شدن حدود ۶۲ درصد بود، در صورتی که عیار آهن گندله تولیدی در سوئد امروزه حدود ۷۰ درصد است زیرا برای تولید گندله بر حسب نوع سنگ، سطوح ویژه حقیقی مواد آهن دار و... دانه‌بندی بهینه حدود ۶۰ میکرون است. لذا برای تولید گندله می‌توان سنگ آهن را تا حد دانه‌بندی بهینه خرد کرد (۶۰ میکرون) تا جدایش نزدیک به کل مواد همراه سنگ آهن امکان‌پذیر شود. علاوه بر این حمل و نقل کنسانتره سنگ آهن حتی با دانه‌بندی مناسب برای تولید زینتر از معادن سنگ آهن بزرگیل به اروپا و ژاپن و... مانند حمل مواد آهن دار با دانه‌بندی مناسب تولید زینتر از معادن چغارت به ذوب آهن اصفهان مشکلات فنی زیادی دارند.

واحدهای تولیدکننده زینتر عموماً باید در جوار کوره بلند قرار داشته باشند. محل ایده‌آل برای تولید گندله از دید فنی و اقتصادی برخلاف فولاد مبارکه و اهواز باید در نزدیک معادن سنگ آهن مانند گل‌گهر، چادرملو، سنگان و... باشد. امروزه بیش از ۸۰ درصد گندله سنگ آهن مصرفی صنایع فولاد جهان در نزدیک معادن سنگ آهن قرار دارد. شایان ذکر است که گندله تولیدی برخلاف زینتر از قابلیت حمل و نقل خوبی برخوردار است، به عبارت دیگر احداث یک کارخانه گندله‌سازی در جوار معادن سنگ آهن علاوه بر اینکه ارزش افزوده ماده معدنی را به همراه دارد سبب افزایش سطح تکنولوژی‌های موجود در معادن می‌شود.

در شکل ۵-۲ چند دانه گندله پخته شده سنگ آهن دیده می‌شود.



شکل ۵-۲- گندله پخته شده سنگ آهن [۱۱].

گندله‌سازی در صنعت تولید آهن یکی از فرآیندهای آماده‌سازی است که در طی آن ذرات نرمه کانی آهن با عیار بالا و یا کنسانتره، به ابعاد بزرگتر و به شکل تقریباً کروی (گندله) تبدیل می‌شوند. در این فرآیند، نسبتی مناسب از مخلوط کانسنگ آهن که تا اندازه لازم خرد شده به همراه رطوبت و مواد افزودنی در ماشین‌های ویژه‌ای به گندله خام تبدیل شده، و سپس برای به دست آوردن استحکام و مقاومت کافی در کوره‌های پخت سخت می‌شوند تا قابلیت باردهی به کوره‌های تولید آهن خام و اسفنجی پیدا کند. به طور کلی هدف از گندله‌سازی در صنعت آهن و فولاد عبارتند از [۱۰]:

- استفاده بهینه از نرمه کانسنگ آهن با عیار بالا برای مصرف در کوره‌های احیا بویژه احیای مستقیم،

- تهیه بار اولیه مناسب برای کوره‌های احیا با خواص فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و متالورژیکی مطلوب،
- کاهش سرباره‌سازی و افزایش راندمان تولید،
- کاهش هزینه‌های تصفیه در مراحل بعدی تولید آهن و فولاد (ذوب و تصفیه)،
- گندله‌ها باید دارای برخی از مشخصه‌های ذیل باشند [۱۱]:
- محدوده دانه‌بندی با قطر ۱۵-۹ (۱۶) میلی‌متر (۸۰ تا ۹۰ درصد گندله‌ها)،
- تخلخل بالا بین ۲۵ تا ۳۰ درصد،
- احیا پذیری عالی،
- قابلیت چسبندگی کم،
- قابلیت تورم در حد مناسب،
- ایده‌آل برای احیای مستقیم،
- عدم افت در اشتعال،
- مقاومت مکانیکی بالا و یکنواخت،
- مقاومت سایشی بالا در حین نقل و انتقال،
- استحکام مکانیکی کافی برای تحمل تنش‌های حرارتی در شرایط احیایی محیط،

۲-۵- گندله و آگلومره‌های کانه آهن

مفهوم فرآیند آگلومراسیون، چسبیدن ذرات ریز به هم و ایجاد یک توده متخلخل با استحکام مکانیکی بالا است.

آگلومراسیون نرمه سنگ‌های آهن، به سه روش متداول است [۸]:

الف- بریکتسازی^۱

ب- کلوخه‌سازی^۲

ج- گندله‌سازی^۳

ساده‌ترین و آسان‌ترین روش آگلومره‌سازی مواد اولیه دانه ریز، بریکتسازی است. بریکتسازی نوعی آگلومراسیون مواد معدنی است که در آن، کانی‌ها با چسب یا بدون آن در ماشین‌های پرس مکانیکی یا هیدرولیکی ویژه به ابعاد معین فشرده و

¹. Briquetting

². Sintering

³. Pelletizing

قالب‌گیری می‌شوند [۱۰]. برای مثال، کانه‌های آهن دانه ریز با اضافه کردن مقداری آب یا چسب تحت فشار مکانیکی بالا برای تبدیل به بریکت فشرده می‌شوند. این بریکت‌ها قبل از این که مورد استفاده قرار گیرند ممکن است مورد عملیات حرارتی واقع شود. با توجه به موارد بالا، ظرفیت تولید واحدهای بریکت در مقایسه با مقدار زیاد کانه‌های ریز دانه یا کنسانترهای آگلومره شده محدود می‌باشد. در حال حاضر دو میان و مهم‌ترین روش آگلومراسیون، کلوخه‌سازی با مکش از پایین^۱ می‌باشد. این روش با گندله‌سازی، تفاوت دارد و دارای مشخصات زیر است [۱۰]:

- استفاده از ذرات دانه درشت تا قطر ۸ میلی‌متر،

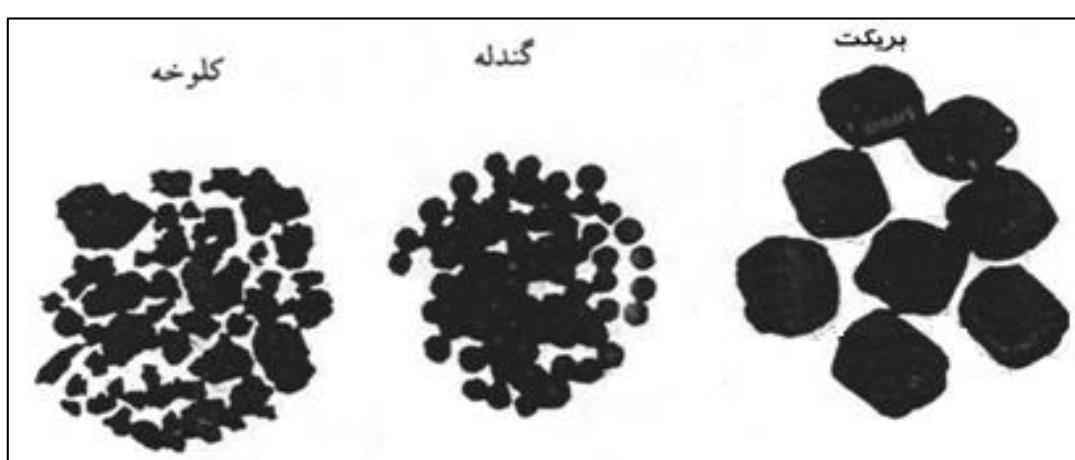
- پس‌مانده کک به عنوان منبع اصلی انرژی،

- حرارت دادن مخلوط دانه‌بندی شده تا دمای نرم شدن،

- تولید نهایی شامل یک کیک کلوخه‌ای اسفنجی است که تا حدی گداخته شده و به وسیله خردایش، آسیا و سرند به اندازه‌های مورد نیاز یعنی ۵ تا ۳۰ و ۵۰ تا ۵۰ میلی‌متر دانه‌بندی می‌شود. در فرآیند تولید کلوخه، اندازه ذرات باید درشت باشد (بیش از ۸ میلی‌متر) و ذرات کمتر از ۸ میلی‌متر (تا یک میلی‌متر) محدود می‌باشد.

از میان انواع روش‌های مذکور، امروزه گندله‌سازی توسعه چشمگیری یافته است.

بنابراین با وجود محدودیت‌های روش‌های بریکت و کلوخه‌سازی، روش گندله‌سازی به منظور تولید گندله یکنواخت و مرغوب در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۶-۲، شکل‌های مختلف آگلومرهایی را که با این سه روش تولید شده‌اند، نشان داده شده است [۸].



^۱. Down-draft sintering



شکل ۶-۲- مقایسه بریکت‌ها، گندله‌ها و کلوخه‌های آهن [۸].

برای تولید گندله، نرمه کانسنگ آهن که حدود ۹۰ درصد آن بر حسب کیفیت سنگ آهن، سطوح ویژه جانبی آن، ژنز سنگ، مواد همراه و... می‌تواند حدود ۴۵ میکرون باشد، با افزودنی‌هایی مانند بنتونیت، هیدرواکسید کلسیم، دولومیت و... برای بهبود خواص گندله‌های خام و پخته تولیدی، جهت بهبود خواص متالورژیکی گندله‌های پخته شده، مخلوط می‌کنند. در نهایت پس از تنظیم ۸۵ درصد جامد و اضافه کردن حدود ۱۵ درصد رطوبت مورد نیاز در مخلوط موادی که باید به گندله تبدیل شوند، در دیسک تولید گندله که در زمان ریزش مواد در داخل دیسک به آن اسپری می‌شود. مواد آهن‌دار در دیسک‌های تولید گندله خام به گردش درآمده و گندله‌ها تولیدی با ابعاد مناسب از لبه دیسک خارج می‌شوند. سپس گندله‌های خام را خشک و سخت می‌کنند تا ویژگی‌های متالورژیکی مورد نظر در گندله پخته شده ایجاد شود.

۶-۲- عوامل موثر بر کیفیت گندله

عوامل موثر بر کیفیت گندله متعدد هستند؛ از جمله آن‌ها می‌توان به ساختار بلوری مواد، نوع افروندی و اندازه ذرات اشاره کرد.

۶-۲-۱- تاثیر ساختار بلوری مواد در کیفیت گندله

ساختار بلوری به ویژه برای کانه‌های آهن‌دار عامل قطعی در استحکام گندله و قابلیت گندله‌سازی مواد است. اجزای رسی و چسبینده و مهم‌تر از همه شکل و طبیعت سطح ذرات کانه در گندله‌سازی موثر است. شکل و طبیعت ذرات بر حسب ترکیب مخلوط مواد تغییر می‌کند و در [جدول ۱-۲](#) ارائه شده است:

جدول ۱-۲- تغییرات شکل و طبیعت ذرات بر حسب ترکیب گندله.

شکل ذره	ساختار بلوری
ورقهای، دانه‌ای	هماتیت، گوتیت، کوارتز، کائولن
ورقهای، الیافی	هماتیت، گوتیت، کوارتز، کلسیت
ورقهای، مکعبی	مگنتیت، هماتیت، گوتیت، کوارتز
مکعبی، کروی	مگنتیت، پیریت، کوارتز

کانه‌های هماتیتی - گوتیت با ذرات ورقهای و سطح دندانهای اختلاف قابل ملاحظه‌ای در استحکام گندله دارند که به درصد رطوبت آن‌ها نیز مربوط می‌شود. مگنتیت با ذرات گوشه تیز و سطوح یکنواخت یک مورد استثنایی است.

۶-۲- تاثیر مواد افزودنی در کیفیت گندله

سنگ‌های آهن مورد مصرف برای گندله‌سازی از نقطه نظر ترکیب شیمیایی و نیز مخلوط آن‌ها، همواره کلیه خواص لازم برای تولید گندله و خواص مکانیکی چون استحکام فشاری، عدد سقوط، مقاومت به سایش و خواص متالورژیکی چون قابلیت احیا، تخلخل، انبساط و انقباض و غیره را ندارند. از جهت تامین خواص مطلوب در گندله‌های خام و پخته، موادی به بار اولیه افزوده می‌شود. مواد افزودنی نقش مهمی در خواص گندله دارند. تاثیر این مواد به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- بهبود قابلیت گندله شدن،

- افزایش استحکام گندله خام، خشک و گندله پخته،

- تنظیم ترکیب شیمیایی و بلوری و کیفیت گندله‌های پخته.

مواد افزودنی مورد استفاده متداول در صنعت گندله‌سازی عبارتند از بنتونیت، آهک، سیلیکات سدیم و سیمان از مواد افزودنی نظری مواد آلی مانند دکسترين، سولفیت، قیر و مواد غیر آلی مخصوصاً ترکیبات قلیایی نیز استفاده می‌شود. برای بهبود خواص مکانیکی و کاهش نرم‌های گندله‌های خام و پخته در اثر خرد شدن، غالباً از چسبنده‌ها استفاده می‌شود، در حالی که برای تنظیم ترکیب شیمیایی و بهبود قابلیت احیا ترکیبات کلسیم و منیزیم (آهک، دولومیت) به کار می‌روند که مفید هستند. مواد چسبنده مانند سیمان پرتلند و آهک هیدراته نیز مصرف می‌شوند که علاوه بر خواص شیمیایی بر استحکام مکانیکی گندله‌ها نیز تاثیر دارند.^[۱۲]

۲-۶-۳- تاثیر دانه‌بندی و سطح ویژه ذرات بار اولیه در رشد گندله

برای تغليظ سنگ آهن هر چه اندازه دانه‌ها نرم‌تر شود، انرژی مصرفی در آسیاهای بیشتر می‌شود ولی در عوض درجه آزادی ذرات ناچالص سنگ آهن بالاتر رفته و امکان جداسازی آن‌ها بیشتر می‌شود. از طرف دیگر اندازه و دانه‌بندی ذرات بر سرعت تولید و رشد گلوله و گندله‌ها و نیز خواص گندله‌ها تاثیر می‌گذارد. طبق پژوهش‌های به عمل آمده برای تولید گندله هر چه درصد مواد زیر ۴۵ میکرون بیشتر باشد قابلیت گندله شدن نرم‌های افزایش می‌یابد. بهترین شرایط در حالتی است که صد درصد ذرات، زیر ۴۵ میکرون باشند. اما چون با کاهش ابعاد ذرات و افزایش سطح ویژه آنها، انرژی مصرفی آسیاهای بالا می‌رود و از طرف دیگر تخلخل گندله‌ها کاهش می‌یابد، عملاً این حالت مطلوب نیست. شرایط بهینه از نظر ابعاد ذرات در حالتی است که ۷۰ تا ۸۰ درصد ذرات زیر ۴۵ میکرون باشند. با کاهش ابعاد ذرات که متناسب با افزایش سطح ویژه است، جذب آب در سطح ذرات و ایجاد نیروهای مویینه تسريع می‌شود.

- تاثیر دانه‌بندی و سطح ویژه ذرات بار اولیه در کیفیت گندله: همانطور که پیش از این اشاره شد با افزایش زمان آسیا کردن، با کوچکتر شدن ذرات، سطح ویژه آن افزایش می‌یابد، در نتیجه نیروهای مویینه بین ذرات در فرآیند تولید گندله خام بیشتر شده و فشردگی بین اجزای گندله خام در فرآیند تولید بیشتر می‌شود و تخلخل آن‌ها به علت افزایش جرم ویژه کاهش می‌یابد. لذا با افزایش درصد ذرات زیر ۴۵ میکرون استحکام فشاری گندله‌های خام و پخته افزایش و مقاومت به سایش آن‌ها بهبود می‌یابد.

- تاثیر رطوبت بار اولیه بر رشد گندله‌ها: رطوبت یکی از عوامل مهم در تولید و رشد گندله است، بدین ترتیب که نخست یک لایه نازک (فیلم) از آب در سطح ذرات ایجاد می‌شود که موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر و تشکیل و رشد گندله می‌شود. اگر آب برای یک نوع گندله از حد معینی کمتر باشد جوانه زنی و رشد صورت نگرفته و هر چه رطوبت همراه با بر گندله‌ها اضافه شود، ابعاد گندله درشت تر خواهد شد. افزودن بنتونیت به علت جذب آب باعث کاهش رشد می‌شود.

- تاثیر رطوبت بار اولیه بر کیفیت گندله: میزان رطوبت بر استحکام فشاری و عدد سقوط گندله خام موثر است. استحکام فشاری گندله‌های خام با افزایش رطوبت به علت چسبیدن ذرات به یکدیگر از طریق خاصیت مویینه افزایش می‌یابد اما در صورت افزایش رطوبت بیش از حد معین به علت وضعیت شناوری ذرات در آب، ایجاد حالت پلاستیکی و گل شدن بار، استحکام فشاری گندله کاهش می‌یابد. تاثیر آب بر مقاومت گندله‌ها برای یک نوع خاص مواد اولیه معتبر بوده و عمومیت ندارد، زیرا تشکیل فیلم آب بر سطح ذرات به ویژگی سطح ذره بستگی دارد. برخی از سطوح قادر به تشکیل و نگهداری فیلم آب نیستند یا اینکه فیلم آب به صورت ناقص تشکیل می‌شود. این ویژگی مختص سطوح آبگریز یا هیدروفوب است. با افزودن مواد شیمیایی

می‌توان کشش سطحی مایعات یا ذرات را تغییر داد و هم چنین سطوح ذرات آبگریز را به سطوح آبدوست (هیدروفیل) تبدیل کرد.

- تاثیر درجه pH آب بر خواص گندله: با تغییر pH آب اضافه شده به مواد قلیایی مانند هیدروکسید سدیم و پتاسیم و مواد دیگری مانند کلرور آهن، خواص مکانیکی گندله‌های خام تغییر می‌کند. تحت شرایط ثابت با تغییر pH آب عدد متوسط سقوط آزاد و نیز استحکام گندله‌ها تغییر می‌یابد. زیرا pH آب بر پیوند بین ذرات و در نتیجه بر فشردگی گندله تاثیر دارد. در حدود ۶/۶ تا ۷ استحکام گندله‌های خام پایین بوده و از آن پس با افزایش pH استحکام گندله خام افزایش می‌یابد.

۷-۲- ویژگی گندله‌ها

۷-۲-۱- خواص فیزیکی گندله

از این لحاظ مهم است که گندله‌ها باید در حین حمل و نقل، خشک و سخت شدن در درجه حرارت بالا باید بارهای مکانیکی قابل ملاحظه را تحمل کنند. بنابراین آن‌ها باید مقاومت به سایش و استحکام فشاری کافی برابر خرد شدن را دارا باشند. بر اساس موارد استفاده گندله‌ها، خصوصیات آنها فرق می‌کند. برای دستیابی به این خصوصیات از مواد افزودنی خاص استفاده می‌شود. همین‌طور دستگاه مورد استفاده برای تولید گندله باید بتواند خواص لازم را تامین کند. روش انتقال آن‌ها به واحد پخت باید طوری طراحی شود که کمترین ضربه و تنفس بر گندله وارد آید.

در گندله‌های مصرفی در کوره بلند یا در روش‌های احیای مستقیم، در روند احیا تغییراتی به وجود می‌آید که ممکن است باعث خرد و متلاشی شدن آن‌ها گردد، لذا بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی گندله‌ها و احیا پذیری آن‌ها اهمیت شایان توجهی دارد. لازم است که آزمایش‌هایی به منظور تعیین خواص گندله، تحت شرایط استاندارد انجام شود. کیفیت گندله‌ها به ویژگی‌های شیمیایی، مکانیکی و متالورژیکی آن‌ها بستگی دارد. هر یک از خواص در روند تولید گندله، احیا و نیز ذوب و پالایش آهن اسفنجی و آهن خام موثر می‌باشند. از عوامل تعیین‌کننده در گندله‌ها می‌توان به ابعاد، شکل، سطح ویژه، توزیع ابعاد، تخلخل، مقاومت به سایش و اصطکاک آن‌ها اشاره کرد.

۷-۲-۱-۱- ابعاد گندله

گندله‌ها بر حسب اندازه در سه گروه قرار می‌گیرند:

- گندله ریز با قطر ۳ تا ۸ میلیمتر جهت کلوخه‌سازی و فرآیند هیدرومیکانیکی،
- گندله‌های عادی با قطر ۱۰ تا ۱۵ میلیمتر جهت استفاده در کوره بلند و واحدهای احیای مستقیم،
- گندله‌های بزرگ با قطر ۲۰ تا ۳۰ میلیمتر جهت استفاده در فولادسازی و مواد خام برای تولید سیمان،

۲-۱-۷-۲- تخلخل گندله

تخلخل یکی از خواص ویژه گندله‌ها است و نقش مهمی در تمام مراحل گندله‌سازی و مصرف آن بازی می‌کند. در گندله‌های خام، تخلخل نتیجه حذف یکنواخت آب و تبخیر آن است. تخلخل در گندله روی خاصیت احیاء‌شوندگی بسیار موثر است. با افزایش تخلخل خاصیت احیا شوندگی بسیاری از گندله‌ها تحت شرایط خاص افزایش می‌یابد. از طرف دیگر تخلخل نسبت معکوس با استحکام گندله دارد و افزایش آن باعث کاهش استحکام گندله می‌شود، لذا در تنظیم این دو عامل باید حالت بهینه انتخاب شود. تخلخل به اندازه ذرات و روش گندله‌سازی بستگی دارد و نقش مهمی در خشک کردن و پختن دارد. طی این مراحل رطوبت تبخیر شده و استحاله (دگرشکلی) فازها رخ می‌دهد و مواد مجدداً کریستالیزه می‌شوند. با در نظر گرفتن استحکام لازم، بهترین تخلخل گندله‌ها حدود ۳۰ تا ۲۰ درصد می‌باشد. تخلخل کل گندله‌ها، حجم حفره‌ها نسبت به حجم کل گندله خام تعریف شده است و با استفاده از اختلاف وزن مخصوص حقیقی و ظاهری از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{\text{total}} = \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_t} \right) \times 100$$

وزن ظاهری گندله (ρ_p)،

وزن مخصوص حقیقی گندله (ρ_t)،

۲-۱-۷-۳- رطوبت گندله

طبق تعریف رطوبت گندله خام مقدار آب گندله مرطوب (W_{H_2O}) نسبت به وزن گندله خشک (W) بیان می‌شود. برای بیان رطوبت گندله معادلاتی تعیین گردیده که برای ارزیابی درصد رطوبت ماده خام به کار می‌روند:

$$H = \left(\frac{W_{\text{total}} - W}{W} \right) \times 100 = \frac{W_{H_2O}}{W} \times 100$$

- روش‌های سنجش رطوبت مواد خام گندله

رطوبت مواد، مخلوط مواد و مواد خام گندله می‌تواند به طور مستقیم یا غیر مستقیم تعیین شود. هنگام انتخاب یک روش برای اندازه‌گیری درصد رطوبت موارد زیر باید ملاحظه شود:

- سرعت اندازه‌گیری،

- کاربردی بودن روش در عملیات مداوم،

الف- روش مستقیم

ارزیابی درصد رطوبت می‌تواند به روش کاملاً مستقیم بر اساس خشک کردن و توزین و در فرآیند مداوم توسط روش‌های الکتریکی و تابشی صورت گیرد. رطوبت از طریق خشک کردن و توزین نمونه‌ها تعیین می‌گردد و درصد وزنی نسبی رطوبت (نسبی W) محاسبه می‌شود:

$$\frac{M_w - M_s}{M_s} \times 100 = W_{\text{نسبی}}$$

وزن نمونه مرطوب و M_s وزن نمونه خشک است.

ب- روش غیر مستقیم

ب ۱- تعیین رطوبت از طریق سنجش هدایت الکتریکی

برای تعیین رطوبت از طریق اندازه‌گیری هدایت از این واقعیت استفاده شده است که با افزایش درصد رطوبت هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. تجهیزات لازم برای این روش ساده، در دسترس هستند و محدودیت‌های دما، فشردگی مواد و نیز تماس نمونه‌ها با الکترودها وجود دارد [۱].

ب ۲- تعیین رطوبت از طریق سنجش دی الکتریک

روش دی الکتریک بر پایه سنجش دی الکتریک آب استوار است که بالاتر از ثابت دی الکتریک مواد معدنی است. بنابراین هر چه رطوبت مواد بیشتر باشد ثابت دی الکتریک آن‌ها افزونتر می‌شود. با اندازه‌گیری ثابت دی الکتریک یا تغییرات آن در نمونه می‌توان به کمیت یا تغییرات رطوبت نمونه دست یافت. البته ضریب تصحیح نتایج برای در نظر گرفتن تاثیر دما و تراکم نمونه پایه باید در نظر گرفته شوند [۱].

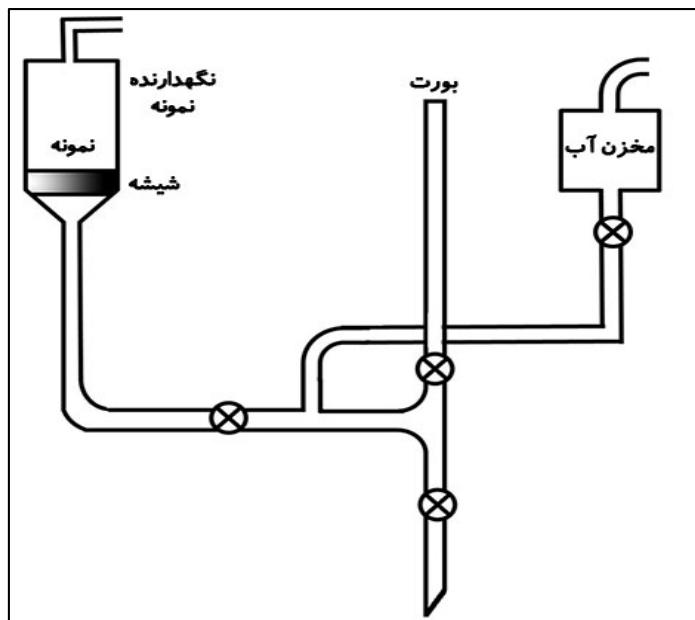
ب ۳- تعیین رطوبت از طریق سنجش تابش اشعه رادیواکتیو

تعیین رطوبت به روش رادیواکتیو که عملاً کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر پایه تضعیف شدت اشعه گاما و بتا تابشی به نمونه و اندازه‌گیری آن اشعه‌ها استوار است. تضعیف اشعه در یک ضخامت معین از نمونه به میزان رطوبت آن ماده مربوط است [۱].

ب ۴- تعیین رطوبت از طریق سنجش اشعه نوترونی

روش نوترونی به طور وسیعی برای اندازه‌گیری درصد رطوبت مواد به کار می‌رود. در این روش نوترون‌ها توسط اتم هیدروژن کند می‌شوند. اساس اندازه‌گیری بر این اصل استوار است که جریان نوترون‌های سریع ساطع شده، از مقطعی از ماده عبور و توسط هسته هیدروژن تغییر می‌کند و میزان تغییرات اندازه‌گیری می‌شود. اگرچه این شیوه سنجش رطوبت به ترکیب شیمیایی مواد حساسیت زیادی نشان می‌دهد اما مزیت آن در دقت و سرعت اندازه‌گیری است. امکان استفاده از آن در فرآیندهای مدام و کنترل فرآیند وجود دارد [۱].

درصد بهینه رطوبت گندله‌ها از طریق تجربه یا اندازه‌گیری‌های آزمایش‌اهی قابلیت مواد برای جذب رطوبت تعیین می‌شود. روش‌های مختلفی برای تخمین رطوبت بهینه وجود دارد اما نتایج همواره با تجربیات واقعی در فرآیند گندله‌سازی مطابقت ندارند. طرح یک دستگاه ساده برای سنجش رطوبت در **شکل ۷-۲** نشان داده شده است.



شکل ۷-۲- طرحی شماتیک از دستگاه رطوبت سنج [۱].

محفظه‌های این دستگاه با آب پر شده و نمونه‌ها برای حذف گازها در آب غوطه ور می‌شوند. در مدتی که سطح آب بالاتر از سطح حمام نمونه است، آب به طور یکنواخت از دو شاخه دستگاه به بیرون جریان می‌یابد. لحظه‌ای که آب به سطح بالای حمام نمونه می‌رسد، آب در قسمت مدرج فقط تا ارتفاعی که اختلاف سطح در لوله بر فشار مویینگی غلبه کند، بالا می‌رود. خواندن عدد روی بورت مقدار رطوبت گندله است. اشکال این روش و روش‌های مشابه حذف تاثیر دینامیک گندله‌سازی است. به علاوه پخش ذرات در نمونه همواره معرف پخش آن‌ها در داخل گندله است و به این دلایل درصد رطوبت تعیین شده با این روش‌ها تقریبی است [۱].

۲-۷-۲- خواص مکانیکی گندله

مهمترین خاصیت مکانیکی گندله‌ها، استحکام آن‌هاست که از مجموعه خواصی نظیر مقاومت فشاری، مقاومت به ضربه و فرسایش نتیجه می‌شود. هر یک از این خواص مستلزم آزمایش‌های جداگانه‌ای است.

۲-۷-۲-۱- آزمایش استحکام فشاری گندله

استحکام مکانیکی که بر مبنای استحکام فشاری، مقاومت سایش و خرد شدن ارزیابی می‌شود، برای گندله‌های خام و پخته یکسان است. مقاومت فشاری گندله‌ها بر اساس استاندارد بین‌المللی ISO از طریق اعمال باری به صورت یکنواخت و تدریجی بر تک‌تک گندله‌های مستقر بین دو سطح موازی تا مرحله خرد شدن سنجیده می‌شود. مجموعاً تعداد ۵۰ تا ۶۰ گندله به صورت تکی تحت فشار قرار داده و استحکام آن‌ها بر حسب نیوتون بر گندله برآورده می‌شود. حداقل نیروی لازم برای خرد شدن گندله، مقاومت یا استحکام فشاری نامیده می‌شود. از آنجایی که ابعاد گندله‌ها متفاوت است، نیروی لازم برای خرد شدن آن‌ها نیز کاملاً متفاوت خواهد بود. برای بدست آوردن میانگین استحکام گندله‌ها باید تعداد زیادی گندله مورد آزمایش قرار گیرد و سپس متوسط استحکام فشاری آن‌ها تعیین می‌شود. استحکام گندله‌هایی با قطر ۱۴ میلیمتر حدود ۲۰ تا ۵۰ نیوتون است [۱].

در روش دیگر حدود ۲ کیلوگرم گندله را با ابعاد ۱۰ تا ۱۵ میلیمتر پس از خشک شدن در داخل یک استوانه با قطر ۲۰۰ میلیمتر ریخته و سپس با پیستون، نیروی معادل ۱۰۰ تن فشار روی آن‌ها اعمال می‌شود. آنگاه گندله‌ها از استوانه خارج و میزان درصد خرد گندله‌های بزرگتر از ۵ میلیمتر به عنوان ضریب و یا مقاومت فشاری ارائه می‌شود [۱].

۲-۷-۲-۲- آزمایش استحکام سایشی گندله

استحکام سایشی گندله‌ها از طریق روش‌هایی مشابه آزمایش مقاومت کلخه بررسی می‌شود. این آزمایش بر مبنای حرکت گندله‌ها در یک استوانه چرخان محتوی میله‌های فولادی در حال صعود و نزول و چرخش، صورت می‌گیرد. بدین ترتیب با چرخش استوانه در اثر سایش گندله‌ها به یکدیگر و نیز ضربه‌های وارد شده از گندله‌ها به یکدیگر، به میله‌ها و بدنه استوانه، پس از مدتی معین، استوانه متوقف و میزان نرمه ایجاد شده توزین می‌شود. میزان نرمه ایجاد شده معیاری برای مقاومت به سایش گندله‌ها به شمار می‌آید [۱].

در یک گندله مناسب ضریب فرسایش باید حدود ۸۱ تا ۹۰ درصد و ضریب ایجاد غبار کمتر از ۳ تا ۵ درصد باشد. وزن بار اولیه و ابعاد آن در استانداردهای مختلف متغیر می‌باشد، لذا در ضرایب داده شده باید نحوه آزمایش را نیز ذکر کرد.

۲-۷-۲- آزمایش استحکام در سقوط آزاد گندله

به منظور اندازه‌گیری استحکام گندله‌های خام و پخته مقاومت آن‌ها در برابر شکست در سقوط آزاد اندازه‌گیری می‌شود.

استحکام در سقوط آزاد از طریق رها کردن گندله از فاصله ۳۰ الی ۴۵ سانتی‌متری روی صفحه‌ای فولادی به دست می‌آید. تعداد دفعات سقوط آزاد گندله بدون صدمه دیدن آن‌ها تعیین می‌شود. مجموعاً تعداد ۱۰ گندله مورد آزمایش قرار می‌گیرد و میانگین تعداد سقوط آن‌ها محاسبه می‌شود. در استانداردهای دیگر تعداد حقيقی گندله با ابعاد بزرگ‌تر از ۱۰ میلیمتر از ارتفاع ۲ متری، چهار بار روی سطح بتنی رها می‌شود و سپس گندله‌ها جمع و ارزیابی از طریق سرنده ۱۰ میلیمتری صورت می‌گیرد. اگر گندله‌های خرد شده زیر ۱۰ میلیمتر کمتر از ۲۰ درصد باشد در این صورت مقاومت به ضربه گندله خوب و مناسب است [۱]. آزمایش سقوط برای گندله‌های پخته نیز انجام می‌گیرد، اما تعداد دفعات سقوط و نیز ارتفاع سقوط چندین برابر است. در یک استاندارد دیگر ارتفاع رها شدن گندله‌ها ۴ متر است و از طریق ارزیابی آنالیز سرندي فوق، درصد مواد خرد شده، مشخص کننده مقاومت به ضربه می‌باشد، لذا مشخصات آزمایش مهم است و باید نحوه انجام آن ارائه شود. تعداد دفعات سقوط آزاد گندله خام سالم و مناسب بین ۴ تا ۷ می‌باشد [۱].

۲-۷-۴- آزمایش استحکام حرارتی گندله

گندله‌هایی که در کوره بلند یا در واحدهای احیای مستقیم احیا می‌شوند در اثر انتقال از قسمت‌های مختلف کوره، تحت تاثیر شرایط متفاوتی از نظر دما قرار می‌گیرند. این تغییرات فیزیکی متنوع شامل تورم و متلاشی شدن است. گندله و کلوخه‌ها عملاً به علت ویژگی آن‌ها در کوره‌ها متلاشی نمی‌شوند. این پدیده بیشتر مربوط به سنگ‌های آهن متراکم می‌باشد. دمای متلاشی شدن سنگ‌های آهن در حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد قرار دارد.

عامل اصلی متلاشی شدن سنگ‌ها در اثر تبخیر سریع آب مولکولی و ترکیبی و هم چنین انبساط مختلف سنگ آهن در جهات مختلف شبکه بلوری آن است. تجربه نشان می‌دهد که وجود حدود ۱۰ درصد تخلخل در سنگ‌ها، مانع از متلاشی شدن آن‌ها می‌شود. چون مقدار تخلخل در گندله و کلوخه همواره بیشتر از این حد است، لذا عملاً کلوخه و گندله در اثر این عوامل متلاشی نمی‌شوند. اندازه‌گیری ضریب متلاشی شدن عبارتست از گرم کردن مواد با ابعاد بزرگ‌تر از ۲۰ میلی متر تا حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد و سرد کردن آن‌ها در هوای آزاد و سپس دانه بندی و تعیین مقدار درصد دانه‌های زیر ۵٪ میلیمتر. گاهی اوقات در این آزمایش دانه‌های کوچکتر از ۵ میلیمتر اندازه‌گیری می‌شود و درصد آن ضریب برای متلاشی شدن است. جهت تعیین مقاومت حرارتی گندله‌های خام، دمایی را که حداقل ۸۰ درصد گندله‌های خشک شده صدمه نبینند اندازه‌گیری می‌شود. به این منظور ۱۰ عدد گندله خام در کوره پیش گرم شده به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده می‌شوند و بعد از خارج کردن آن‌ها از کوره نسبت تعداد گندله‌های سالم به کل گندله‌ها معیاری برای استحکام حرارتی گندله‌ها خواهد بود. مقاومت در برابر شوک

حرارتی، توانایی و مقاومت در برابر تغییرات ناگهانی است که به عواملی نظیر تخلخل، ابعاد ذرات و قطر گندله ارتباط دارد. مقاومت فشاری گندله در اثر گرم شدن به سرعت کاهش می‌یابد. گندله‌ها در داخل کوره بلند باید فشار اعمال شده از سایر مواد را که در روی آن‌ها قرار دارند تحمل کنند و خرد نشوند. اگر دما در کوره حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و وزن مخصوص ظاهری بار حدود ۲ گرم به ازای هر سانتی متر مکعب فرض شود فشار واردہ بر یک سانتی متر مربع گندله ۴ کیلوگرم می‌شود. با فرض اینکه گندله‌ها کروی و قطر آن‌ها ۱۶ میلیمتر باشد ماکزیمم سطح گندله در مقابل فشار معادل حدود ۲ سانتیمتر مربع است و در نتیجه فشار واردہ بر آن حدود ۸ کیلوگرم خواهد بود. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲، هر گندله باید در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد حدود ۱۵ تا ۲۰ کیلوگرم فشار را تحمل کند[۱].

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تحت دمای بالا، گندله در یک کوره در اتمسفر خنثی و دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد و نیروی لازم برای خرد کردن آن اندازه‌گیری می‌شود. باید توجه داشت که اندازه‌گیری مقاومت فشاری گندله در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد وضع واقعی گندله را در کوره نشان نمی‌دهد زیرا در کوره‌های احیا در این درجه حرارت گندله تحت شرایط احیا نیز قرار دارد و عمل احیا در این درجه حرارت کاملاً محسوس بوده و عملکرد احیا در تورم و خرد و متلاشی شدن گندله اثر بسیار مهمی دارد.

۸-۲- تئوری گندله‌سازی

۸-۱- مکانیسم اتصال ذرات در فرآیند گندله‌سازی

اولین بار فیرتس^۱ در سال ۱۹۴۴ میلادی کشف کرد که در اثر دوران نرمه سنگ آهن مربوط در استوانه‌ای گردان، گندله‌هایی متراکم و مقاوم تولید می‌شود. وی معتقد بود که در اثر چرخیدن استوانه گردان، هر لحظه چندین ذره به یکدیگر چسبیده و باعث رشد آن می‌گردد. زیرا در روند چرخش و غلتیدن گندله اولیه در بستر کانه، هر ذره گندله همواره به طور یکنواخت وزن و فشار تمام گندله را تحمل می‌کند و این باعث تراکم و تشکیل گندله کروی می‌شود. لذا عامل اصلی رشد گندله، فشارهای ایجاد شده در اثر وزن گندله خام است که به صورت رابطه زیر حاصل می‌شود [۵].

$$(p) = \frac{(w)}{(s)}$$

که در آن، w : وزن گندله، s : سطح تماس گندله با دستگاه، p : فشار ناشی از وزن گندله

^۱. Firths

چون S کم است، لذا p زیاد شده و این باعث چسبیدن ذرات ریز به گندله و درشت شدن آن می‌گردد. برخی از دانشمندان کشش سطحی مایع مرطوب کننده (آب) را مهم‌ترین عامل اتصال ذرات می‌دانند. اگر آب در حدی باشد که فقط در محل تماس ذرات واقع شود حالت آونگی و اگر به اندازه‌ای باشد که تمام حفره‌های داخل گندله را پر کند (نه حفره‌های سطحی) حالت مویینگی ایجاد می‌شود. استحکام فشاری گندله در حالت مویینگی سه برابر حالت آونگی است که به صورت رابطه زیر حاصل می‌شود [۴].

$T_c=3Tp$

که در آن، T_c : استحکام فشاری در حالت مویینگی و T_p : استحکام فشاری در حالت آونگی می‌باشد.

در مقیاس صنعتی حالت مویینگی را ایجاد می‌کنند و آب نباید بیشتر از حد مورد نیاز باشد. حضور چسب باعث افزایش کشش سطحی آب می‌گردد و در تشکیل آن نقش بسیار موثری دارد. همان‌طور که گفته شد مخلوط مواد (پودر سنگ آهن، مواد چسبنده و آب) در محفظه دوار ماشین گندله‌ساز که تحت شیب معینی قرار گرفته، ریخته می‌شود. در این ماشین‌ها محفظه دوار با سرعت مشخصی در حال چرخش است. ذرات بار گندله به طور مداوم توسط آب به یکدیگر پیوسته و به دلیل چرخش محفظه محتوى گندله‌ها، مواد تجمع پیدا می‌کنند و شکل کروی به خود می‌گیرند. در این فرآیند، تشکیل گندله در دو مرحله انجام می‌شود [۸].

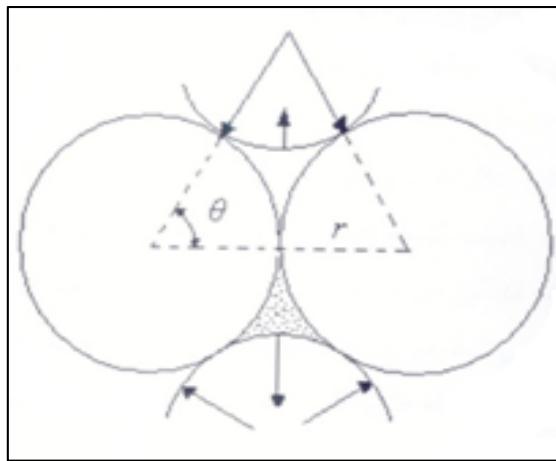
- مرحله اول: تشکیل هسته گندله^۱

- مرحله دوم: رشد هسته‌های تشکیل شده و رسیدن آن‌ها به ابعاد مطلوب

تشکیل و رشد هسته‌های اولیه ممکن است به علت کشش سطحی آب باشد که برخی از قسمت‌های ذرات گندله را احاطه کرده است یا به دلیل خاصیت مویینه آب باشد که در داخل خلل و فرج ذرات نفوذ کرده است و باعث پیوستگی ذرات می‌شود. هسته گندله‌ها اغلب در نواحی پاشیدن ذرات آب تشکیل می‌شود. در این ناحیه، احتمال مرطوب شدن ذرات تشکیل‌دهنده گندله بیشتر و در نتیجه شرایط تشکیل هسته‌های اولیه گندله بیشتر است. هسته‌های اولیه گندله با چرخیدن در محفظه‌های دوار ماشین‌های گندله‌ساز و برخورد با ذرات خشک گندله و یا هسته‌های دیگر که هنوز به اندازه کافی رشد نکرده‌اند، تشکیل گندله بزرگ‌تر را می‌دهند و بر قطرشان افزوده می‌شود.

نحوه قرار گرفتن آب یا مایع دیگر بین دو ذره گندله در شکل ۸-۲ نشان داده شده است [۱۰].

^۱. Nucleation



شکل ۸-۲- نحوه قرار گرفتن آب یا مایع دیگر بین دو ذره گندله [۱۰].

به منظور پیوستن ذرات گندله خام به یکدیگر در محفظه‌های دوار ماشین گندله ساز، به جز کشش سطحی آب یا مایعات چسبنده دیگر، قابلیت آغشته شدن ذرات جامد بار گندله با آب یا مایعاتی دیگر، اثر تعیین کننده‌ای دارد. تجمع ذرات جامد آغشته به آب، به طور کلی در اثر نیروی مکانیکی حاصل از مایعات نفوذ کرده در خلل و فرج ذرات اولیه گندله است. نفوذ آب و یا مایعات دیگر در سطوح ذرات و خلل و فرج آن‌ها و استحکام حاصل از نیروهای مویینه و رشد هسته‌ها بر اثر غلتیدن ذرات کانه بر روی یکدیگر، باعث پیوستگی آن‌ها به یکدیگر می‌شود و تراکم و مقاومت مناسبی را به گندله خام می‌دهد. عوامل متعدد دیگری از جمله عدم یکنواختی ذرات گندله، می‌توانند سبب پیوستگی ذرات شوند. مکانیسم ساده‌ای برای تشریح استحکام کششی ذرات توسط رومپف^۱ ارائه شده است [۱۰].

براساس تئوری رومپف، استحکام کششی بین دو ذره کروی شکل گندله، به صورت رابطه زیر حاصل می‌شود [۴].

$$\tau = \frac{\pi \sigma}{r(1 + \tan \theta / 2)}$$

که در آن، σ = کشش سطحی آب (مایع دیگر)، θ = زاویه محصور بین ذرات گندله و آب، τ = استحکام کششی و r = شعاع ذره می‌باشد.

زاویه θ از جمله به نوع کانه و شکل ذرات بستگی دارد. از این رابطه چنین استنباط می‌شود که هرگاه رطوبت وجود نداشته باشد زاویه θ برابر با صفر و یا بسیار کوچک و استحکام کششی حداقل می‌شود. تحت این شرایط ذرات اصلاً به یکدیگر نمی‌چسبند و از طرف دیگر اگر آب بیش از حد مطلوب وجود داشته باشد، ذرات توسط آب خیس شده و نیروی مویینه و استحکام کششی حداقل می‌شود. تحت این شرایط ذرات اصلاً به یکدیگر نمی‌چسبند. اگر میزان آب از حد مطلوب خیلی فراتر رود، ذرات

^۱. Rumpf

توسط آب خیس شده و نیروی مویینه و استحکام کششی ذرات از بین می‌رود و ذرات گندله عملاً از یکدیگر جدا می‌شوند. لذا

با زاویه θ نیروی جاذبه بین ذرات و استحکام کششی بین آن‌ها حداقل می‌شود [۱۰].

۲-۸-۲- عوامل مهم اتصال ذرات در فرآیند گندله‌سازی

عوامل مهم در ساخت گندله‌خام و ویژگی‌های آن را می‌توان به گروه‌های زیر تقسیم کرد [۱۱]:

الف) نیروهای فیزیکی (نیروی واندروالس، نیروهای مغناطیسی یا الکترواستاتیک)،

ب) عوامل ظاهری (اندازه، توزیع اندازه، شکل و ساختار کریستالی ذرات)،

پ) عوامل بنیادی (ضریب جذب با توجه به ساختار تخلخل، وجود اجزاء قابل انبساط، ویژگی‌های شیمیایی در کانه اولیه یا فرآورده فرعی بعد از انجام عملیات قبلی)،

ت) نیروهای موئینگی و کشش سطحی در طی افزودن چسب‌های مایع (آب)،

برخی از این عوامل، بویژه پارامترهای مربوط به مواد اولیه (عوامل بنیادی) ثابت هستند ولی تاثیر بسیار زیادی بر ساخت گندله خام دارند. سایر نیروها که در تهیه گندله‌سازی تاثیر دارند، متغیر بوده و با بهره‌گیری و کنترل این نیروها، می‌توان مواد اولیه تشکیل گندله را با نیازهای مربوطه وفق داد. عواملی مانند میزان عامل افزودنی ترکننده، شکل ذرات، تجهیزات مورد استفاده در ساخت گندله خام، نیروهای ایجاد شده و جابه‌جایی مواد اولیه موجود در این تجهیزات به عنوان عوامل متغیر می‌باشند.

۹-۲- مراحل و روش‌های تولید گندله

پروسه گندله‌سازی شامل سه مرحله است:

۱) آماده‌سازی مواد اولیه (شامل خرد کردن، جدایش، افزودن مواد چسبنده و مخلوط کردن)،

۲) تشکیل گندله‌های خام،

۳) سخت کردن و پختن گندله،

تفاوت فرآیند تولید گندله عمدهاً در مرحله سوم از مراحل فوق است. بنابراین در اینجا قبل از پرداختن به شرح تکنولوژی‌های مزبور، مطالبی به اختصار در ارتباط به دو مرحله اولیه تولید گندله بیان خواهد شد.

۱-۹-۲- آماده‌سازی مواد اولیه

پیش از ایجاد گندله‌های خام، برای تنظیم ترکیب شیمیایی و رطوبت خوراک، کانسنگ‌آهن را با روش‌های تر یا خشک در آسیاهای گلوله‌ای یا میله‌ای به اندازه مناسب خرد می‌کنند و چنانچه از روش تر استفاده شده باشد قبل از ارسال به مرحله مخلوطسازی باید رطوبت آن به کمتر از رطوبت نهایی بهینه برای تولید گندله کاهش داده شود و سپس برای مخلوطسازی ارسال می‌شود. در مخلوطسازی، مواد نرم شده با مواد چسبنده مانند بنتونیت (حدود ۰/۵ تا یک درصد) و موادی مثل سنگ آهک، الیوین و دولومیت (حدود یک تا ۵ درصد) و... مخلوط شده و رطوبت این مواد بسته به نوع و ویژگی‌های کانسنگ‌آهن در حدود ۱۰ درصد تنظیم می‌شوند. این مواد، به گندله خواص فیزیکی و متالورژیکی لازم برای مراحل بعدی را می‌دهد. عملیات مخلوط شدن در میکسرهای استوانه‌ای شکل انجام می‌پذیرد.^[۲]

جدول ۲-۲- مواد تشکیل دهنده گندله و مقدار آن.

درصد	ترکیبات
۰/۵ تا ۱ درصد	بنتونیت
۱ تا ۵ درصد	آهک، الیوین و دولومیت
بقیه	سنگ آهن نرم شده
۱۰ درصد	رطوبت

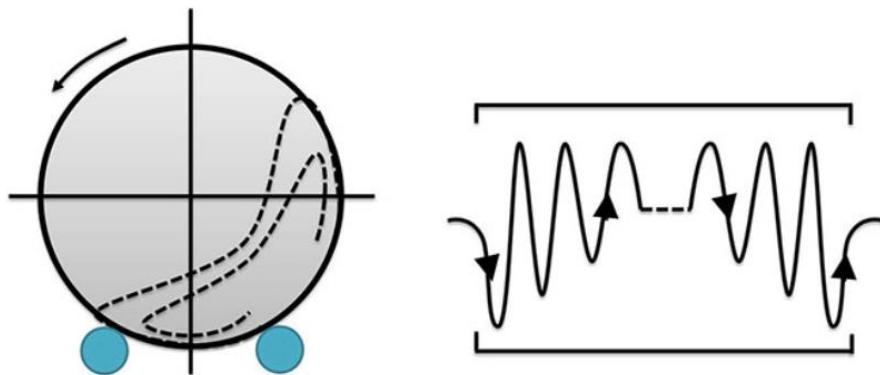
۲-۹-۲- ساخت گندله خام

گندله خام به دو روش می‌تواند تولید شود که عبارتند از: استوانه دور و دیسک‌های گندله‌ساز.

۱-۲-۹-۲- استوانه دور^۱

تا سال ۱۹۵۰ میلادی که نخستین دیسک‌های گندله‌ساز وارد صنعت شدند یگانه راه تولید گندله خام به شمار می‌آمد. در این دستگاه‌های استوانه‌ای شکل، نسبت طول به قطر آنها حدود ۳ تا ۴ می‌باشد. استوانه‌های دور دارای شب ملايم ۸ تا ۱۵ درجه با افق می‌باشد. بار و رطوبت از یک طرف وارد استوانه شده و در داخل استوانه غلتیده و از سوی دیگر خارج می‌شود. طرح مقطعی از یک دستگاه گندله‌سازی استوانه‌ای در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.

^۱ Balling Drum



شکل ۹-۲- نمایی از استوانه دوران جهت تولید گندله خام.

- سرعت دوران استوانه دوران

در دستگاه‌های گندله‌سازی سرعت دوران استوانه باید کمتر از سرعت بحرانی آن باشد. سرعت بحرانی سرعتی است که نیروی گریز از مرکز وارد شده بر دانه‌ها و گندله‌ها معادل نیروی وزن آنها بوده و در نتیجه دانه‌ها و گندله‌ها به جدار استوانه چسبیده و سقوط نمی‌کنند. در نتیجه عمل غلتیدن انجام نشده و گندله تولید نمی‌شود. سرعت بحرانی را می‌توان از طریق الگوهایی محاسبه نمود. نیروی گریز از مرکز وارد شده بر آن برابر خواهد بود با:

$$W = \frac{W \cdot V^2}{g \cdot R}$$

R شعاع استوانه، g شتاب ثقل و V سرعت خطی می‌باشد که مقدار آن برابر است با:

$$V^2 = g \cdot R$$

از طرفی دیگر سرعت خطی V برابر است با:

$$V = 2\pi \cdot N_c \cdot R$$

لذا سرعت بحرانی N_c برابر است با:

$$N_c = \sqrt{\frac{g}{4\pi^2 \cdot R}} \cong \frac{0.705}{\sqrt{D}}$$

$$N_c = \frac{42.5}{\sqrt{D}}$$

که در آن D قطر استوانه است. ملاحظه می‌شود که سرعت بحرانی مستقل از وزن ذرات می‌باشد و فقط به قطر استوانه بستگی دارد.

غلتیدن ذرات روی یکدیگر اثر تراکمی شدید بر ذرات داشته و بر مقاومت گندله خام بسیار موثر است، لذا در استوانه‌های دور برای آنکه عمل غلتیدن به خوبی انجام گیرد باید سرعت دورانی استوانه از $40 - 25$ درصد سرعت بحرانی تجاوز نکند. هرقدر سرعت دورانی استوانه دور کمتر باشد زمان توقف ذرات در داخل استوانه بیشتر بوده و گندله مقاوم‌تر خواهد شد. ولی سرعت تولید گندله در استوانه دور کمتر خواهد بود. برای زمان توقف گندله در داخل استوانه رابطه‌های تجربی متفاوتی برآورده شده است که یکی از آنها در ادامه بیان شده است:

$$t = \frac{0.037(\alpha + 24) \times l}{n \cdot D \cdot S}$$

α زاویه غلتیدن ذرات روی یکدیگر (زاویه قرار گرفتن ذرات جسم در سطح افقی) می‌باشد و مقدار آن 25 تا 35 درجه و برای اجسام مختلف تغییر می‌کند.

l طول استوانه به متر،

n تعداد دوران استوانه به دور در دقیقه،

D قطر داخلی استوانه به متر،

S شیب استوانه به درصد،

t زمان توقف با استوانه به دقیقه.

ظرفیت تولید گندله در ساعت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot l \cdot \gamma \cdot \rho \cdot R'}{4t}$$

در این رابطه

R' درصد گندله تولیدی،

ρ وزن مخصوص ظاهری،

γ درصد حجم اشغال شده استوانه توسط بار،

P ظرفیت تولید گندله در ساعت.

۲-۹-۲- دیسک‌های گندله‌ساز

تا سال ۱۹۵۰ تنها دستگاه قابل استفاده برای تولید گندله در مقیاس صنعتی استوانه‌های دوار بود تا اینکه در این سال استفاده از دیسک‌های گندله‌سازی توسط شرکت لورگی معرفی شد. در حال حاضر تمامی طرح‌ها و کارخانه‌های فعال تولید گندله در ایران مانند سایر کشورهای دنیا، از دیسک‌های دوار برای تولید گندله خام استفاده می‌کنند. در **شکل ۱۰-۲** یک دیسک گندله‌ساز دیده می‌شوند. در این دیسک‌ها ذرات پودر در اثر رطوبت و تماسی که با یکدیگر پیدا می‌کنند به یکدیگر چسبیده و پس از اینکه قطر گلوله‌های شکل گرفته به اندازه کافی رشد کرد، از لبه دیسک خارج می‌شوند. عواملی همچون کیفیت ذرات پودرشده، میزان رطوبت، شب، قطر و سرعت چرخش دیسک در اندازه و کیفیت گندله تولیدی مؤثر هستند. فاکتورهای فوق عمدتاً برای هر سنگ معدنی با مشخصات معین باید به صورت تجربی تنظیم شوند.

یک دیسک گندله‌سازی مشابه آنچه در واحد گندله سازی گل‌گهر نصب شده است در دو تصویر مختلف دیده می‌شوند. قطر دیسک گندله‌سازی مبارکه حدود ۶ متر است. تیغه‌های دوار برای جلوگیری از چسبیدن بیش از حد مواد آهن‌دار به کف دیسک تعییه شده‌اند. البته برای تنظیم رطوبت تجهیزات لازم جهت اسپری کردن آب به مواد جامد در حین ریزش به کف دیسک نیز درنظر گرفته شده است.

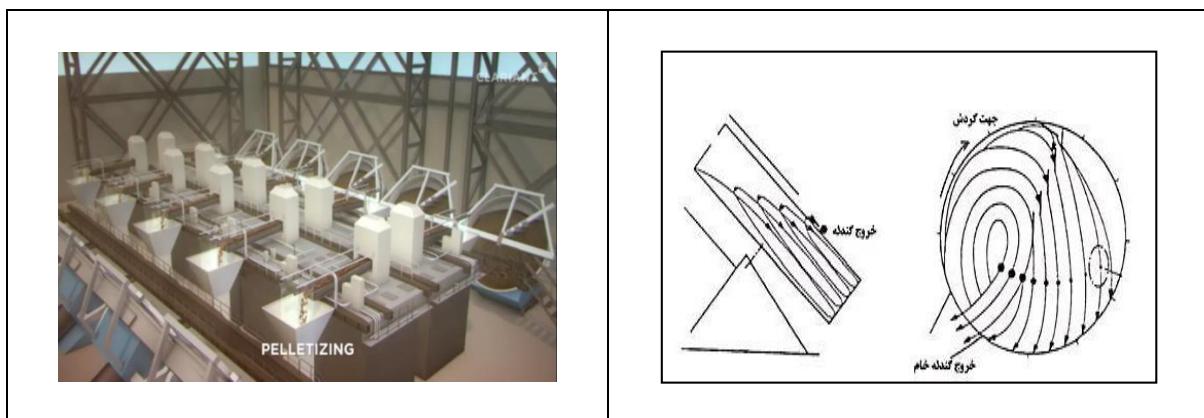


شکل ۱۰-۲ (الف) نمایی از یک دیسک گندله ساز (ب) نمایی دیگر از دیسک تولید گندله به همراه تجهیزات آن.

- شرایط عملیاتی:

استحکام گندله‌ها در هنگام غلتیدن از بالا به پایین دیسک که باعث متراکم شدن آنها می‌شود، به تدریج افزایش می‌باید بنابراین هرچه زاویه دیسک کمتر باشد، استحکام گندله بیشتر خواهد شد. وقتی قطر دیسک افزایش یابد، برای یک زاویه ثابت، سرعت غلتیدن گندله‌ها نیز افزایش خواهد یافت و هرگاه این سرعت از حد خاصی بیشتر شود، باعث از هم پاشیدن گندله‌های

خام تولیدی بر اثر برخورد می‌شود. این اثر را با کم کردن زاویه دیسک می‌توان خنثی کرد [۱]. بنابراین باید برای هر نوع کنسانتره سنگ‌آهن، زاویه دیسک و سرعت آن را به صورت تجربی تنظیم و با هم وفق داد. گندله‌های خام تولیدی را آزمایش کرده و بر مبنای نتایج آزمایش نسبت به تغییر جزیی فاکتورهای مختلف و موثر اقدامات لازم بعمل می‌آید تا کیفیت گندله خام به صورت تجربی بهینه‌سازی گردد. برای این کار یک واحد پایلوت تولید گندله خام تقریباً همیشه در جوار خط تولید گندله وجود خواهد داشت مانند واحد پایلوت تولید گندله در مجتمع فولاد اهواز. نوع حرکت جهت تولید گندله با کیفیت، استحکام مکانیکی و... متناسب با حرکت چرخشی دیسک می‌باشد. طرح شماتیک حرکت مواد در داخل دیسک در **شکل ۱۱-۲** آورده شده است.



شکل ۱۱-۲- چرخش غلتشی (غلتیدن) در دیسک مناسب‌ترین نوع حرکت مواد برای تولید گندله [۱].

۹-۳-۲- سخت کردن و پخت گندله

قبل از به‌دست آوردن گندله‌های قابل مصرف، آخرین مرحله فرآوری، خشک و سخت‌کردن گندله‌ها به کمک گرماست. سخت‌کردن گندله‌ها خواصی به آنها می‌بخشد که هم برای حمل و نقل و هم برای عملیات متالورژیکی آنها ضروری است. سخت کردن گرمایی گندله‌های خام در مقیاس صنعتی در ۴ مرحله صورت می‌گیرد:

الف- خشک کردن،

ب- پیش گرم کردن،

ج- پخت،

د- سرد کردن،

همان‌طور که ذکر شد تفاوت در روش‌های تولید گندله در مرحله پخت ظهور پیدا می‌کند. بر همین اساس مهمترین تکنولوژی‌های رایج پخت و سخت کردن گندله به اختصار ارائه خواهد شد.

۲-۹-۱- خشک کردن گندله خام

گندله‌های خام تولیدی در دیسک دور استحکام بسیار کمی دارند، بنابراین باید ابتدا خشک و سپس پخته و سخت شوند. منظور از خشک کردن این است که گندله تولیدی تا حدی مقاوم شود تا بتواند مرحله پیشگرم شدن را تحمل کند.

به طور کلی وقتی یک گندله خام در اتمسفر با دما و رطوبت معین قرار می‌گیرد، یا رطوبت از دست می‌دهد و یا رطوبت جذب می‌کند تا تعادل برقرار شود. در شرایط تعادل مقدار آب موجود در گندله به دما و درصد رطوبت هوا بستگی دارد. موقع حذف رطوبت از گندله خام، شکل منحنی سرعت خشک شدن تا اندازه‌ای به مواد جامدی بستگی دارد که گندله از آنها ساخته می‌شود. از دیدگاه نظری، سه مرحله زیر قابل تشخیص است:

- مرحله خشک شدن با سرعت ثابت (حذف رطوبت سطحی یا آب همراه)

در این مرحله فرض می‌شود که عمل حذف رطوبت از سطح گندله، از میان خلل و فرج و سطوح جانبی خارجی صورت می‌گیرد و تا زمانی که رطوبت آزاد در سطح گندله وجود داشته باشد و هوای در تماس با آن اشباع نشده باشد، حذف رطوبت ادامه دارد [۱].

- نخستین مرحله افت سرعت خشک شدن (حذف رطوبت مؤینه)

پس از مرحله اول که در آن گندله‌ها با سرعت ثابت خشک می‌شوند، منحنی خشک شدن وارد مرحله جدیدی شده که در آن دیگر سرعت خشک شدن ثابت نیست بلکه کاهش می‌یابد. در این مرحله سرعت خشک شدن به وسیله سرعت انتقال رطوبت از داخل گندله به خارج آن کنترل می‌شود. بنابراین در این مرحله افزایش سرعت جریان گازهای خشک‌کننده تاثیر زیادی روی سرعت خشک شدن نخواهد داشت [۱].

- دومین مرحله افت سرعت خشک شدن (حذف رطوبت ترکیبی یا مینرالی)

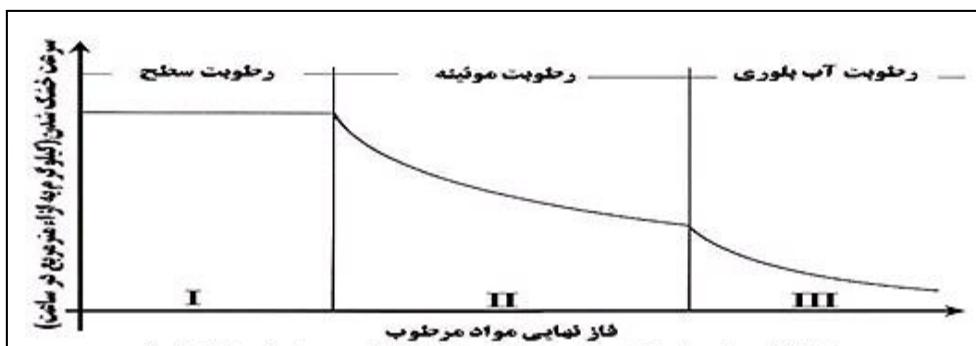
در این مرحله تبخیر رطوبت در داخل گندله‌ها انجام می‌گیرد و بخار آب توسط فرآیند نفوذ به سطح گندله‌ها می‌رسد. بنابراین هر عاملی که نفوذ بخار آب را کنترل کند، سرعت نهایی خشک شدن را تعیین می‌کند. این مورد به شرایط خارج از گندله خام بستگی زیادی ندارد. در دو مرحله اخیر از خشک شدن، سرعت خشک شدن به طور مستقیم با مقدار رطوبت آزاد داخل گندله متناسب است. سرعت خشک شدن گندله به تدریج کم می‌شود تا اینکه گندله از نظر رطوبت با گاز خشک‌کننده به حالت تعادل برسد که این تعادل همان طور که گفته شد به دما و درصد رطوبت گاز بستگی دارد. طرح سرعت خشک شدن

گندله‌ها در مراحل مختلف در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است. خشک کردن گندله‌های مرطوب بخشی از عملیات مقاوم کردن گندله‌ها جهت تامین استحکام کافی در اثر افزایش تدریجی حرارت انجام می‌گیرد. این فرآیند شامل مراحل زیر است [۱]:

۱) گرم شدن گندله تا دمایی که رطوبت تبخیر شود.

۲) تبخیر رطوبت در سطوح خارجی گندله‌ها.

۳) انتقال رطوبت از درون خلل و فرج گندله‌ها به سطوح خارجی و ادامه تبخیر.



شکل ۱۲-۲- طرح شماتیک سرعت خشک شدن گندله در مراحل مختلف [۱].

سرعت خشک شدن گندله‌ها به هدایت حرارتی، تخلخل مواد آنها و چگونگی تبادل حرارت بستگی دارد [۲]. لذا سرعت خشک شدن به سرعت نفوذ رطوبت از درون به سطح و سرعت تبخیر بستگی دارد. هرگاه سرعت انتقال رطوبت از درون به سطوح خارجی گندله‌ها کمتر از سرعت تبخیر باشد رطوبت سطح گندله‌ها به صفر تقلیل پیدا می‌کند و سرعت خشک شدن به سرعت بحرانی می‌رسد و سطح گندله‌ها خشک می‌شود. پس از خشک شدن سطح گندله‌ها، مرحله سوم یعنی انتقال مرز خشک شدن از سطوح خارجی به طرف درون گندله‌ها صورت می‌گیرد و تا مرکز آن و خشک شدن کامل گندله پیش می‌رود. نظر به اینکه سرعت نفوذ رطوبت از درون به خارج گندله وابسته به تخلخل است، لذا تخلخل گندله‌ها باید بالا باشد تا نفوذ به سرعت انجام گرفته و از شوک‌های حرارتی که در اثر تبخیر رطوبت و افزایش حجم در گندله بوجود می‌آید، منجر به ایجاد ترک در گندله نشود. لذا تخلخل و رطوبت گندله‌ها از جمله عوامل موثر و تعیین‌کننده در سرعت خشک کردن و عوارض ناشی از شوک‌های حرارتی و سرانجام کیفیت گندله‌های تولیدی هستند.

۱۲-۳-۲- پیش‌گرم کردن گندله خام

این مرحله در ادامه مراحله خشک کردن و از همان درجات حرارت شروع می‌شود و دمای محیط به طور پیوسته از حدود

۲۲۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در این مرحله عمدتاً تحولات زیر رخ می‌دهد:

۱- تبخیر رطوبت مینرالی،

۲- تجزیه هیدرو اکسید کلسیم،

۳- جدا شدن گوگرد از پیریت،

۴- اکسایش مگنتیت.

در این مرحله تنها مسئله‌ای که از نظر سرعت گرم کردن مطرح است، این است که تمامی گندله‌ها به طور یکنواخت گرم شوند و دما در یک نقطه یا جای خاصی خیلی زیاد و بی‌رویه بالا نرود. بجز مورد اخیر، باید فرآیند و روشی استفاده شود که بهترین انتقال حرارت از گاز به جامد را تامین کند. به عبارت دیگر بازده حرارتی بالا بوده و مصرف انرژی حرارتی حداقل شود. سرعت فرآیند پخت و پیش گرم شدن بیشتر به اکسایش مگنتیت وابسته است. پیشرفت این مرحله توسط تغییر دما و سرعت گاز خروجی کنترل می‌شود. فشارها و دمشنها در این مرحله برای کنترل جریان گاز و حرارت تنظیم می‌شود. برای پخت گندله‌های مگنتیتی زمان پیش گرم شدن طولانی‌تر و زمان پخت کوتاه‌تر است.

۹-۳-۲- پخت گندله‌های خام

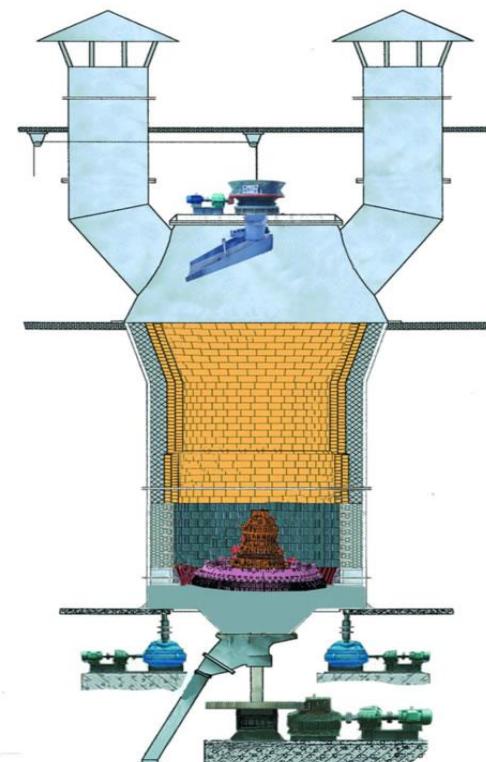
در این مرحله بستر بار گندله‌ها تا حدود ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد گرم می‌شود [۱۲]. مدت نگهداری بار در این دما که زیر نقطه ذوب اجزای تشکیل‌دهنده گندله است باید به اندازه‌ای باشد که اتصال سرامیکی برقرار شود تا خواص مکانیکی لازم در گندله پخته شده ایجاد شود. در حین پخت، مگنتیت به هماتیت تبدیل می‌شود و شبکه مکعبی آن به هگزاگونال تغییر می‌یابد. این تغییر ساختار بلوری از حدود دمای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد شروع و تا حدود دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد می‌تواند ادامه یابد. از گرمای واکنش نیز جهت پخت استفاده می‌شود. در این مرحله نخست بلورهای ریز جدید تشکیل می‌شود و همزمان پل‌های بین دانه‌ای در مرز بلورها شکل گرفته و تشکیل پل‌های بین دانه‌ای مجزا تشدید می‌شود. در دمایی حدود ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد با تبلور مجدد و رشد بلورها، استحکام مطلوب در بلور هماتیتی گندله‌ها حاصل می‌شود.

۱۰-۲- تکنولوژی‌های پخت گندله

آخرین گام در تولید گندله، عمل آوری گرمایی که شامل گرمادهی و پخت در چندین دستگاه است انجام می‌شود.

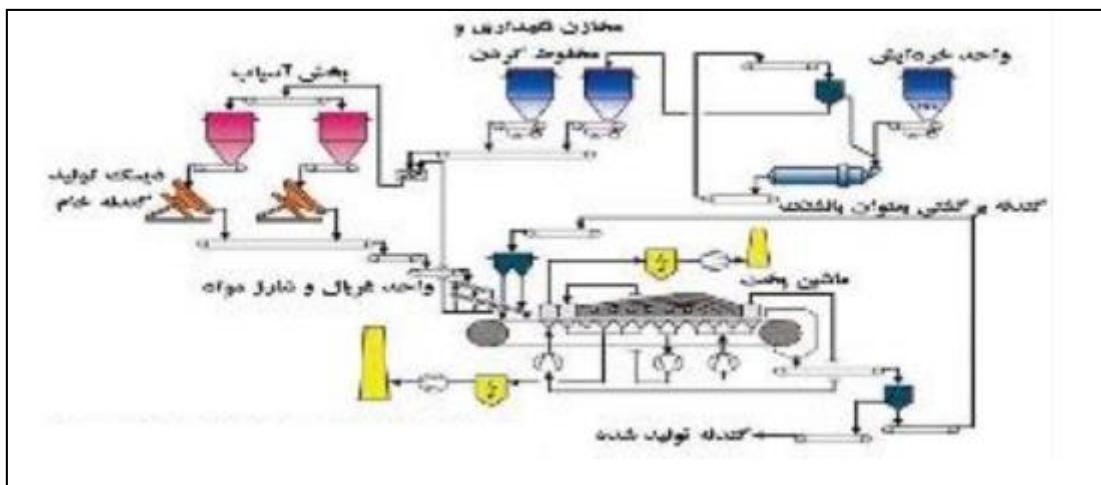
(الف) کوره تنوره‌ای قائم: با توجه به بازده گرمایی بالا و شرایط عملیاتی نسبتاً ساده، از این کوره به عنوان نخستین واحد برای پختن گندله از کنسانتره در کشورهای سوئد و ایالات متحده آمریکا استفاده شد. تا زمانیکه منیتیت ماده اصلی کنسانتره که برای تولید گندله به کار می‌رفت وجود داشت، کوره تنوره‌ای قائم اهمیت زیادی داشت. گندله‌های خام در دهانه کوره تخلیه

می‌شوند. آنها تحت اثر نیروی گرانش از درون مناطق گرمایی به سمت محل تخلیه حرکت می‌کنند. گندله‌ها به حرکت مداوم خود ادامه می‌دهند و در معرض اصطکاک و افزایش فشار قرار می‌گیرند[۲]. مواد سوختنی در اتفاق احتراق که در دو طرف کوره قرار دارند، می‌سوزد و گازهای حاصل از احتراق به داخل کوره فرستاده می‌شود و همراه با هوایی که از پایین کوره به طرف بالا جریان دارد، فرآیند سوختن کامل و باعث جوش ذرات و پخته شدن گندله می‌شود[۱]. در قسمت پایین کوره چرخهای دندانه‌داری بنام چانک بریکر وجود دارد که کار آنها خرد کردن توده‌های بهم چسبیده گندله است. به طوری که گندله‌های پخته شده بتوانند به راحتی از قسمت پایین به خارج هدایت شوند. دو عیب به این کوره‌ها وارد است، یکی اینکه در این کوره‌ها ظرفیت تولید محدود است زیرا گندله‌های خام مقاومت کافی نداشته و اگر ارتفاع کوره زیاد باشد گندله‌های زیرین در اثر فشار، خرد خواهند شد. به خصوص آنکه گندله‌ها در کوره از بالا به پایین حرکت می‌کنند و به این علت شکستن گندله‌ها در کوره تشید می‌شود. قطر کوره نیز به علت محدود بودن طول شعله مشعل‌ها نمی‌تواند به دلخواه زیاد انتخاب شود. در صورت بزرگ بودن قطر کوره گندله‌های موجود در مرکز پخته نخواهند شد. دوم اینکه در روند پخت گندله دستررسی و کنترل گندله‌ها مقدور نیست، در نتیجه این کوره‌ها از انعطاف‌پذیری کمی برخوردار هستند. به طور کلی این کوره‌ها امروزه کاربرد زیادی نداشته و عملاً از صنعت گندله‌سازی خارج شده‌اند.



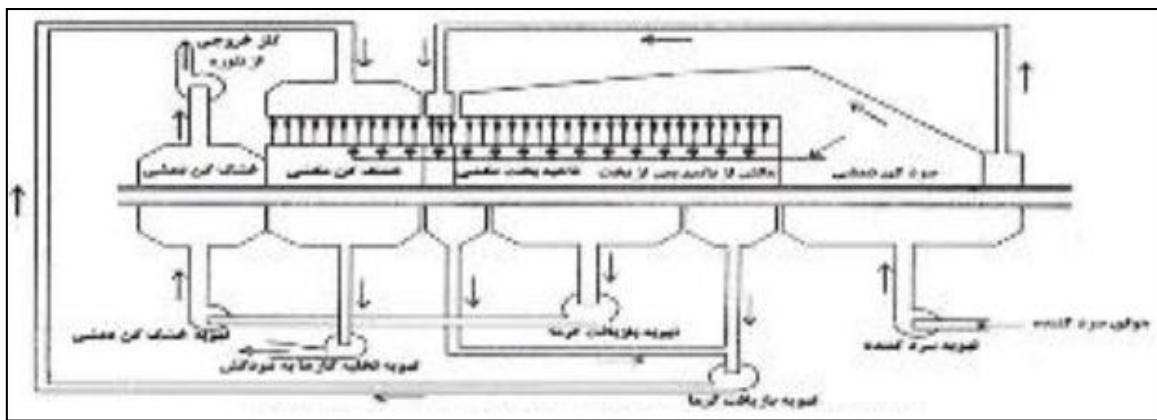
شکل ۱۳-۲- نمایی از کوره تنوره‌ای قائم.

ب) شبکه متحرک (Lurgi): از اوایل قرن گذشته تا سال ۱۹۴۹ شبکه متحرک برای کلوخه‌سازی نرمه کانه‌های آهن ریزدانه به کار رفته بود. پس از اصلاحات کافی در سال ۱۹۵۰ برای پخت گندله وفق داده شد. امروزه از شبکه‌های متحرک برای تولید گندله از انواع کانی‌های آهن دار در جهان استفاده می‌شود. این تجهیزات با ایده گرفتن از ماشین کلوخه‌سازی مداوم یا ماشین دوایت‌لوید به تدریج تکامل نسبی یافته است. با استفاده از شبکه متحرک برای تولید گندله تمام مراحل خشک شدن، پیشگرم و پختن گندله بر روی شبکه فلزی متحرک واحدی انجام می‌گیرد [۹]. در **شکل ۲-۱۴** نمای شماتیکی از استخراج سنگ‌آهن تا تولید گندله پخته شده دیده می‌شود.



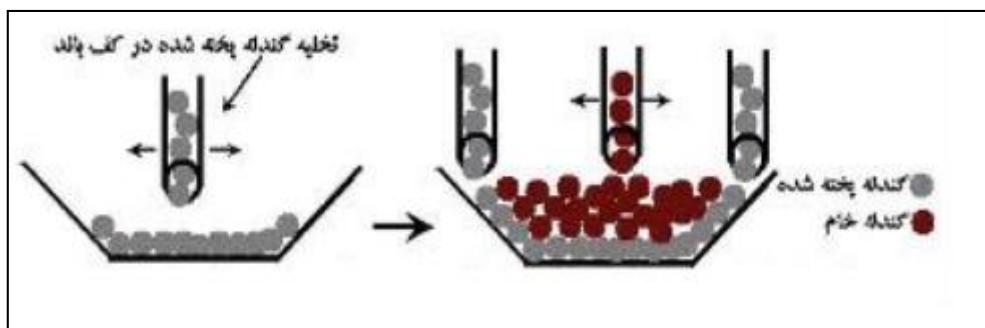
شکل ۱۴-۲- نمای شماتیک تجهیزات تولید گندله به روش زنجیر متحرک [۲].

همان طوری که در شکل دیده می‌شود مواد آهن دار که از معدن استخراج می‌شوند در تجهیزات مختلف خرد و سپس به روش‌های متفاوت تغليظ و نهایتاً کنسانتره با دانه‌بندی مناسب (حدود ۵۰ تا ۶۰ میکرون) به دست می‌آیند. این کنسانتره را پس از مخلوط کردن با مواد چسبنده (مانند بنتونیت، هیدروواکسید کلسیم و...) و افزودن آب به صورت اسپری در حین ریزش و مخلوط مواد اولیه برای تولید گندله داخل دیسک به گندله خام تبدیل می‌کنند. از آنجاییکه گندله خام قبل از پخت فاقد استحکام کافی است از اینرو باید گندله خام تولیدی را در روی خط زنجیره‌ای به طریق خاصی تخلیه کنند. مناطق گرمایی مختلف شبکه متحرک را می‌توان به سهولت به نواحی واکنشی افقی تفکیک کرد و با استفاده از گاز فرآیندی با جریان و دمای کنترل شده آن را با تجهیزات مربوط وفق داد. بعد از این که گندله‌ها بر روی باند زنجیره‌ای متحرک شارژ شوند، در وضعیت سکون نسبی باقی مانند تا وقتی که پس از پختن و سرد شدن تخلیه شوند. آخرین ناحیه باند اختصاص به سرد کردن گندله‌ها، داغ با هماء، تازه دارد. گام، بازیاب شده د. محله سرد شدن: گندله مارد حبه تولید گندله م. شمد. د. شکا -۲



شکل ۱۵-۲- نمایی از طرح ماشین پخت گندله به روش بستر متحرک [۱].

برای حفاظت کف بستر، قشری از گندله برگشتی (پخته شده) روی کف شبکه‌های فلزی قرار داده می‌شود که وجود این قشر گندله پخته شده تا حدودی کف بستر را از حرارت بالا حفظ می‌کند. ضخامت این قشر معمولاً حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد ضخامت کل ارتفاع شارژ گندله را تشکیل می‌دهد. برای اینکه گندله خام با تجهیزات کناره باند در تماس نباشد باید همزمان با تخلیه گندله خام بروی باند مشابه کف باند، کناره‌های واگن نیز با گندله پخته شده پر شوند. بنابراین برای پر کردن باند از گندله خام همانند **شکل ۱۶-۲** از سه سیستم شارژ همزمان استفاده می‌کنند. دو سیستم اقدام به تخلیه گندله پخته در کناره‌های باند می‌کند و در همین حال یک سیستم نیز گندله خام را در وسط باند تخلیه می‌کند. هر سه سیستم شارژ به صورت همزمان عمل می‌کنند. پس از قرار دادن این لایه، گندله خام در روی بستر بارگیری می‌شود [۱].

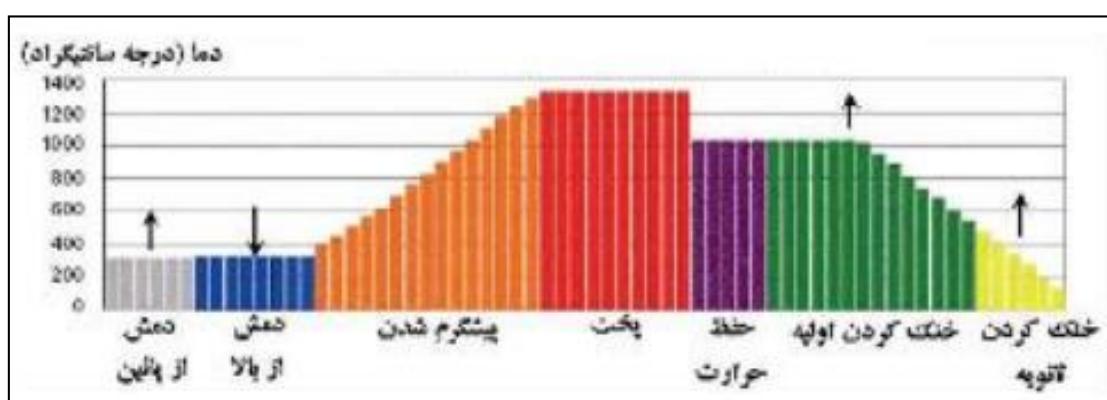


شکل ۱۶-۲- نحوه تخلیه گندله خام و پخته شده بر روی باند متحرک روش لورگی [۱].

واگن‌های پرشده از گندله‌های خام به شرح فوق وارد محفظه پخت گندله می‌شوند. عرض باند حدود ۳ متر و طول باند پخت گندله برحسب نوع کنسانترهای که به گندله آهنی تبدیل خواهند شد می‌تواند تا حدود ۲۰۰ متر باشد. با استفاده از تجهیزاتی مانع ورود یا خروج هوا کنترل نشده در کوره پخت گندله می‌شوند. همان‌طور که در **شکل ۱۷-۲** دیده می‌شود در قسمت اول مدار پخت هوا با دمای حدود ۳۰۰ درجه از زیر به داخل واگن دمیده می‌شود تا رطوبت گندله‌های خام تبخیر شود سپس از بالا نسبت به دمای هوا گرم اقدام می‌کنند. با پیشروی واگن در کوره پخت به تدریج هوا گرم از بالا دمیده می‌شود عملاً کوشش می‌شود بدون استفاده از مشعل دمای گندله داخل واگن را تا حدود ۱۰۰۰ درجه افزایش دهند. پس از آنکه

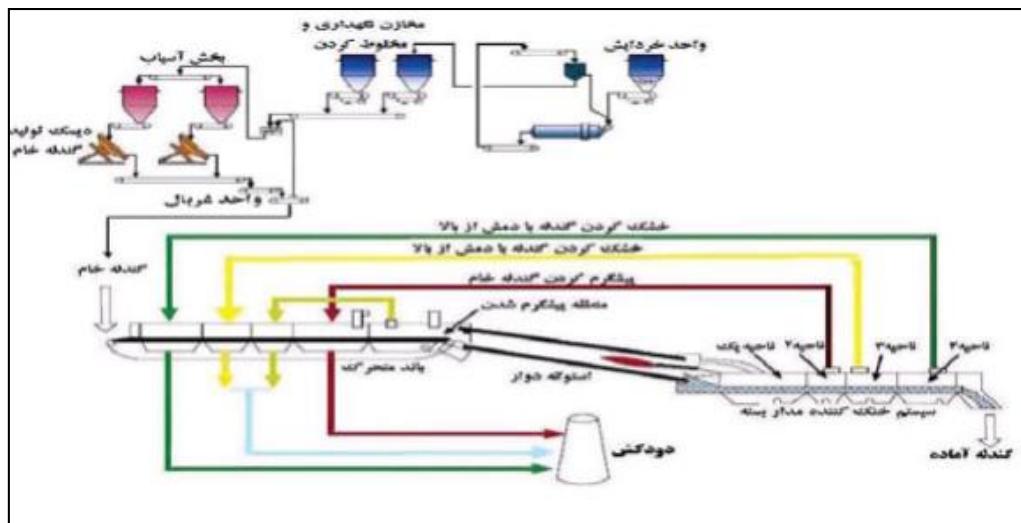
گندله‌ها داخل واگن به حدود ۱۰۰۰ درجه رسیدند برای پخت آنها از انرژی حرارتی تعداد زیادی مشعل استفاده می‌کنند. در اثر گرمای هوا، حرارت گندله‌های داخل واگن‌ها افزایش می‌یابد. حرارت بهینه پخت گندله برحسب کنسانتره‌های مختلف متفاوت خواهد بود. چنانچه گندله‌های خام موجود در واگن‌ها مگنتیتی باشند در دمای حدود ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه مگنتیت به همانیت تبدیل و شکل کریستالی آنها عوض می‌شود. این تغییر فاز حرارت‌زا است. چنانچه گندله‌های خام موجود در واگن‌ها همانیتی باشند به علت عدم تغییر آرایش اتمی کریستال‌ها در محدوده حرارتی فوق برای پخت گندله انرژی بیشتری نیاز است. جهت تامین این انرژی می‌توان در حین تولید گندله خام از کنسانتره همانیتی حرارت مشعل‌های این منطقه را افزایش داد یا درصد کمی نرمه کنسانتره زغال‌سنگ را با کنسانتره همانیتی مخلوط کرد. به علت سوختن نرمه کک حرارت ایجاد شده که کمک به انرژی که از مشعل‌ها به دست می‌آید، می‌کند گندله پخته شده خلل و فرج بیشتری خواهد داشت و آسانتر قابل احیاء است.

شکل ۱۷-۲ تغییرات شماتیکی دما در طول باند متحرک پخت گندله را نشان می‌دهد.



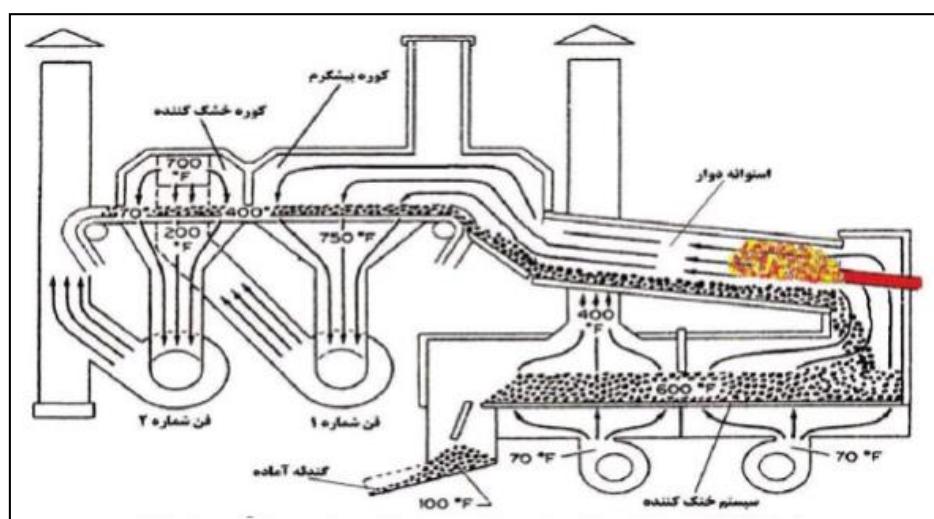
شکل ۱۷-۲- تغییرات حرارت گندله در طول بستر پخت [۱].

ج) شبکه متحرک کوره دوار (Allis-Chalmers): استفاده از این سیستم پخت گندله به تدریج از اوایل دهه ۱۹۶۰ در سطح جهان شروع شد، با الهام از کوره لیپول که برای مدتی در صنایع سیمان استفاده می‌شد، تکامل تدریجی نسبی تولید گندله در شبکه متحرک کوره دوار شروع شد [۱۲]. این فرآیند در سراسر جهان تحت عنوان فرآیند شبکه-کوره شناخته شده و تقریباً مناسب برای تولید گندله از تمام کنسانتره‌های مواد آهن دار است. **شکل ۱۸-۲** نمایی شماتیکی فرآیند پخت گندله به این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸-۲- نمایی از سیستم پخت گندله به روش کوره شبکه.

هدف از جدا کردن مرحله پخت از مراحل خشک کردن و پیشگرم روی یک شبکه یا زنجیر کوتاه و ارزان با هزینه کم انجام شود. برای پخت یکنواخت گندله از کوره دوار استفاده شود. همان‌طور که شکل ۱۸-۲ نشان می‌دهد، گندله‌های خام ابتدا روی شبکه زنجیری یا بستر متحرک خشک شده و تا حدود دمای هزار درجه سانتی‌گراد پیشگرم می‌شوند، سپس در یک کوره دوار پخته و در قسمت زنجیره‌ای بعدی سرد می‌شوند. طول کل تجهیزات پخت گندله در این روش نسبت به روش لورگی کوتاه‌تر خواهد بود. چنانچه از نظر فضا محدودیت داشته باشیم، همان‌طور که در شکل ۱۹-۲ دیده می‌شود می‌توان تجهیزات سرد کردن گندله را در زیر کوره دوار نصب کرد.



شکل ۱۹-۲- قرارگیری قسمت زنجیره‌ای سرد کردن در زیر کوره دوار در روش آليس چالمرز.

در چنین سیستمی می‌توان در حدود ۲۰۰ تن در ساعت گندله تولید کرد. در این روش نیز از انرژی هوای گرمی که از قسمت خنک کردن گندله ایجاد می‌شود برای خشک کردن و همچنین برای هوای مشعل جهت صرفه جویی در انرژی استفاده می‌شود.

یکی از برتقی‌های روش کوره دوار نسبت به روش زنجیر متحرک انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات احتمالی در سرعت انجام فرآیند بخش‌های مختلف است. عنوان مثال در صورتی که به هر دلیل واحد خنک‌کننده گندله پخته شده و یا بخش پیش‌گرم‌کننده گندله خام مجبور به توقف شوند، به دلیل مجزا بودن بخش پخت گندله، امکان تنظیم فرآیند به نحوی که کمترین خلل ممکن به کلیت فرآیند تولید گندله وارد آید وجود دارد. در حالی که در روش باند متحرک از ابتدا تا انتهای فرآیند تولید گندله به صورت یکپارچه در روی یک باند انجام می‌پذیرد و توقف هر بخش، سبب توقف کل خط می‌شود. از مزایای دیگر این روش نسبت به دو روش قبل این است که اولاً گندله تولیدی کیفیت یکنواخت‌تری دارد، ثانیاً اینکه عمل چرخش گندله‌ها در داخل کوره دوار باعث می‌شود که گندله‌های شکسته شده نرم شوند و بتوان آنها را پس از تخلیه، بدون آسیا کردن به سیستم گندله‌سازی برگشت داد. ثالثاً چنانچه بعضی از گندله‌ها ترک داشته باشند، این شанс را خواهند داشت که در کوره دوار ترک‌ها بسته شده و جوش بخورند. در مقابل این مزیت‌ها، هزینه نگهداری و تعمیرات سیستم کوره دوار بیشتر از بستر متحرک است. همچنین کل انرژی مصرفی به ازای تن تولید گندله پخته شده بیشتر از سیستم زنجیر متحرک خواهد بود.

۱۱-۲- خنک کردن گندله پخته شده

به دو علت خنک کردن گندله‌ها گام مهمی در تولید گندله محسوب می‌شود. از یک سو، گندله‌های داغ مقداری گرما در خود دارند که آن را می‌توان با نیت ایجاد تعادل گرمایی مناسب وارد چرخه فرآیند گرمادهی کرد و حتی المقدور تلفات انرژی آن را کاهش داد. امروزه در همه تکنولوژی‌های پخت گندله که در مقیاس صنعتی کار می‌کنند، اقدامات تکنولوژیکی و ساختمانی متناظر انجام می‌شود. با این همه، نکته حائز اهمیت آن است که نباید اجازه داد ترکیبات متبلور و شیشه‌ای تولید شده در حین سخت کردن، در اثر سرعت خنک کردن بیش از حد نیاز، به گندله‌ها آسیب وارد کنند. آزمایش نشان داده است گندله‌هایی را که تا حدود دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به دقت با هوای کنترل شده خنک می‌شوند، می‌توان پس از آن گندله را با آب خنک کرد، بی‌آنکه هیچ آسیبی ببینند. اما اگر گندله‌ها را از حدود دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با آب خنک کنند، تقریباً ۵۰ درصد گندله‌ها به قطعات کوچکتر تبدیل می‌شوند که از نظر ابعادی قابلیت مصرف در کوره بلند و احیای مستقیم را ندارند. از آزمایش‌های دیگر نتایج مشابهی حاصل شد، در این آزمایش‌ها معلوم شد که اگر گندله‌ها را از دمای حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، با فروبردن در آب خنک کنند، مقاومت آنها در برابر خرد شدن به کمتر از نصف مقاومت اولیه گندله تقلیل می‌یابد.

در هنگام تعیین ابعاد تجهیزات خنک کن، باید به دو نکته زیر توجه کرد [۲]:

۱) شیوه دقیق خنک کردن گندله‌ها برای حفظ استحکام آنها،

۲) بازیافت گرمای گندله در حین خنک شدن،

در پایان، اگر مراحل گوناگون فرآوری، از کانه خام تا گندله پخته شده را بازنگری کنیم، می‌بینیم که در شکل‌گیری

گندله‌های سالم چندین مکانیسم چسبندگی دخالت دارند [۲]:

- پل‌های مایع بین دانه‌های مجزای موجود در سنگ‌جوشی که باید گندله شوند، نقش زیادی در تامین استحکام گندله‌های

خام دارند.

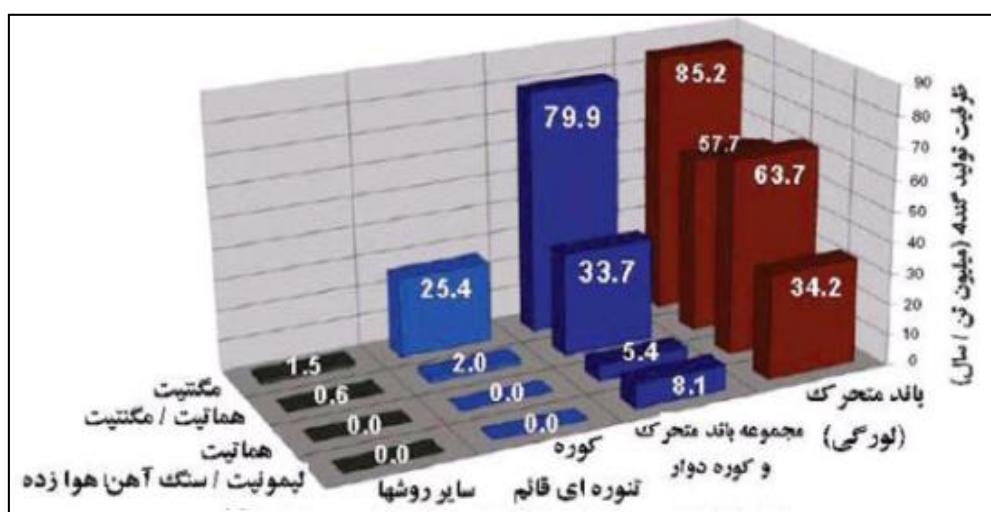
- پل‌های جامد به شکل پیوندهای ملاطی که از طریق ژله‌ها، هیدرات‌ها و نیروهای فصل مشترکی پدید می‌آیند، مؤثر در

استحکام گندله‌های خشک هستند.

- استحکام نهایی گندله‌های سخت شده باز هم به موجب وجود پل‌های جامدی است که از طریق تغییر ساختار بلور، رشد

بلور و کلوجه شدن فازهای مذاب بین دانه‌ای پدید می‌آیند.

در شکل ۲۰-۲ روش‌های مختلف گندله‌سازی در مقیاس صنعتی که هم‌اکنون در سطح جهان رواج دارد دیده شود.



شکل ۲۰-۲- ظرفیت روش‌های مختلف تولید جهانی گندله در سال ۲۰۰۴ [۱۱].

همان‌طور که در این شکل می‌بینیم بیش از ۶۰ درصد ظرفیت تولید گندله جهان را روش باند متحرک (لورگی) به خود

اختصاص می‌دهد (مشابه آنچه که در گندله‌سازی گل گهر سیرجان، فولاد مبارکه، فولاد اهواز و ... وجود دارد). در صورتی که

ظرفیت جهانی تولید گندله به روش مجموعه باند متحرک و کوره دوار حدود نصف ظرفیت واحدهای باند متحرک است.

۲-۱۲-۲- نتایج حاصل از ارزیابی روش‌های تولید گندله

از آنجایی که از ۱۰ سال گذشته تاکنون واحد جدید کوره تنوره‌ای قائم در سطح جهان ساخته و مورد بهره‌برداری قرار نگرفته‌اند، لذا در آینده نزدیک استفاده از این تکنولوژی در واحدهای موجود نیز به تاریخ خواهد پیوست. بنابراین در این قسمت به مقایسه و ارزیابی اجمالی دو روش متدائل پخت گندله یعنی سیستم لورگی و سیستم آلیس چالمرز پرداخته خواهد شد.

۲-۱۲-۱- روش کوره - شبکه یا آلیس چالمرز

- ۱- به کارگیری سیستم زنجیر متحرک و تجهیزات نسبتاً مستقلی برای قسمت خشک‌کردن و پیش گرمایش.
- ۱-۱- هرگونه تاخیر یا وقفه در بخش‌های خشک‌کننده و پیش گرمایش مانعی در انتقال حرارت در مرحله پخت کوره ایجاد نمی‌کند.
- ۱-۲- بهدلیل اینکه مرحله زینترینگ در نوار زنجیره‌ای انجام نمی‌گیرد نیاز به استفاده از گندله پخته شده به عنوان لایه محافظ برای حفاظت شبکه در مقابل حرارت زیاد، نیست.
- ۱-۳- در سیستم شبکه - کوره، پیش گرم کردن در نوار زنجیره‌ای تا زمانی که گندله‌ها به مقاومت و استحکام لازم برای ورود به کوره برسند ادامه پیدا می‌کند.
- ۲- کوره دور برای پخت:
- ۲-۱- انتقال حرارت به گندله‌ها به وسیله گازهای فرایند صورت می‌گیرد که بیشتر در بالای سطح بستر جریان می‌یابند. باقی ماندن در برابر جریان گاز در کوره به طور مکانیکی تنظیم می‌شود.
- ۲-۲- در اثر چرخش کوره دور، گندله‌ها نسبت به هم جابه‌جا شده و در معرض انتقال حرارت به صورت تشعشعی و به طور مستقیم از شعله و انعکاس از دیواره کوره، انتقال حرارت رسانشی بین گازهای فرایند و لایه‌های نسوز تحتانی و همچنین انتقال حرارت هم‌رفتی گازهای فرایند قرار می‌گیرند.
- ۲-۳- کنترل مستقل دما و زمان نگهداری در کوره امکان پخت یکنواخت همه گندله‌ها را تضمین می‌کند.
- ۲-۴- مشاهده و بررسی مراحل پخت، امکان کارهای فوری اصلاحی را در کوره دور، برای احتراز از مشکلاتی مانند خوش‌های شدن گندله‌ها و اشکالات خود کوره، ایجاد می‌کند.
- ۳- خنک‌کن‌ها:
- ۳-۱- خنک‌کاری در سیستم شبکه - کوره به منظور کنترل نرخ خنک شدن محصول و تضمین کیفیت متالورژیکی و شیمیایی آن، در دو یا چهار مرحله انجام می‌پذیرد.
- ۳-۲- سیستم بازیافت حرارت می‌تواند ابعاد تجهیزات خنک‌کننده و غبارات متصاعد شده را کاهش دهد.

۴- فن‌های فرایند:

در مقایسه با سیستم زنجیر متحرک، حذف گندله‌های پخته شده به عنوان لایه محافظ و کاهش ارتفاع بستر، موجب کاهش افت فشار گاز در دوسوی بستر می‌شود. هر دوی این موارد به اضافه این واقعیت که جریان گازی که از بین بستر بگذرد در کوره لازم نیست، به طور قابل ملاحظه‌ای مصرف توان الکتریکی را برای فن‌های فرایند کاهش می‌دهد. اندازه‌گیری‌های انجام شده برای میزان مصرف انرژی الکتریکی فن‌های فرایند مقادیری به کوچکی ۲/۱۱ کیلووات ساعت به‌ازای یک تن تولید گندله را نشان می‌دهد [۲].

۵- کیفیت گندله:

۱-۵ بهم چسبیدن گندله‌ها طی مراحل مختلف خشک کردن، پیش‌گرم، پخت و خنک‌کاری کاهش می‌یابد.
۲-۵ بدلیل مقاومت سایشی مناسب، هدر رفت به صورت غبارات ناشی از سایش در حین جابه‌جایی و نیز در حین فرآیند احیا کمتر است. همچنین از آنجا که گندله پخته شده توسط سیستم شبکه - کوره کاملاً به صورت هماتیتی در می‌آید، درجه فلزی شدن آهن اسفنجی تولید شده در فرآیند احیاء، بالاتر بوده و در نتیجه تلفات آهن به صورت سرباره در فرآیند ذوب کمتر خواهد بود [۲].

۲-۱۲-۲- روش زنجیر متحرک یا لورگی

۱- دستیابی به ظرفیت‌های تولید حدود ۷ میلیون تن در سال در یک مجتمع گندله‌سازی.
۲- به کارگیری تجهیزات زنجیرهای واحد جهت مراحل مختلف خشک‌کردن و پخت و خنک‌کردن گندله.
۳-۱- سالم ماندن گندله‌ها در طول پروسه.
۴-۲- رفتار حرارتی یکنواخت.
۵-۳- تشكیل غبار و نرمه به میزان بسیار کم در فرآیند تولید.
۶-۴- عدم نیاز به کنترل استحکام میانی (کنترل گندله در انتهای قسمت زنجیرهای سیستم آلیس چالمرز).
۷-۵- طبق طراحی، ضخامت بستر گندله بر روی نوار زنجیرهای (grate) در سیستم لورگی بیشتر از سیستم آلیس چالمرز است، این حالت ایجاب می‌کند که خشک کردن در دو مرحله صورت گیرد:
۸- مرحله خشک کردن دمشی (updraft)، که به منظور افزایش مقاومت گندله به‌اندازه کافی برای تحمل فشار ناشی از وزن لایه‌های بالایی انجام می‌پذیرد.
۹- مرحله خشک کردن مکشی (downdraft) به منظور حذف آب باقی‌مانده. در سیستم آلیس چالمرز خشک کردن فقط مکشی است.

۳- غیرمتحرک بودن قسمت‌های عایق کاری شده در کل طول خط گندله‌سازی به روش لورگی سبب کاهش هزینه تعمیرات و نگهداری برای تعویض دیرگدازها می‌شود.

۴- دستیابی به تخلخل بهینه در گندله بهمنظور بالا بردن قابلیت احیا.

۵- عدم تغییر شکل و خرد شدن گندله‌ها و کاهش گرد و غبار تولید شده در حین فرایند.

۶- جریان گاز سازگار با محیط‌زیست و اقتصادی.

چندین فن جریان گاز را به طور مؤثری هدایت می‌کنند. با تعدادی از تکنیک‌های اصلاحی روی جریان گاز در شبکه متحرک، مصرف سوخت و انتشار گاز بر حسب تولید یک تن گندله کمتر از سیستم شبکه - کوره است.

۷- بازیافت گازهای داغ فرایند از ابتدای بخش خنک کن و انتقال این گازها به بخش‌های پخت و پیش گرمایش.

۸- اثرات زیست‌محیطی سیستم.

میزان آلودگی ناشی از سیستم شبکه متحرک به دلیل بهره‌گیری از سیستم‌های غبارگیری قوی مانند تهشیں کننده الکترواستاتیکی (electrostatic precipitator) با قوانین زیست‌محیطی بیشتر سازگار است.

۹- بهینه کردن بخش خشک کن به معنی کاهش مصرف سوخت که از طریق بهینه کردن مراحل خشک کردن با دمچ روبرو باشد (updraft) و رو به پایین (downdraft)، میزان مصرف سوخت در کل فرآیند پخت گندله به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت.

۱۰- مشعل‌ها.

۱۱- طراحی مشعل‌های پیشرفته باعث کاهش مصرف سوخت و کم کردن میزان خوردگی و تشکیل گاز NO_x می‌شود. در این نوع مشعل‌ها از هوای فشرده استفاده می‌کنند که در نتیجه باعث کاهش مصرف سوخت می‌شود.

این مشعل‌های فشار بالا علاوه بر بهبود راندمان احتراق، باعث کاهش تشکیل سرباره و خوردگی شیمیایی نسوزها با استفاده از حذف قطرات ریز نفت می‌شوند. زمانی که توزیع حرارت شعله یکسان باشد، تشکیل گاز سمی NO_x به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۱۲- با توجه به تعداد مشعل‌ها و مسیر جریان گازهای فرآیندی، این فرایند از انعطاف‌پذیری بالایی در صورت تغییر خوارک ورودی برخوردار است.

۱۳- انتقال حرارت به روش همرفت به جای روش تابش موجب رفتار حرارتی یکنواخت در گندله‌ها می‌شود.

۱۱- در نهایت سیستم زنجیر متحرک اجازه هدایت هوشمند سرعت حرکت باند، فن‌های دمنده و مکنده، مشعل‌ها و... بر مبنای اعداد و ارقامی که از قسمت‌های مختلف کل خط پخت گندله از تجهیزات ابزار دقیق مدرن به سیستم هوشمند انتقال می‌یابد، سیستم هوشمند بر مبنای اطلاعات لحظه‌ای دریافت شده به‌طور اتوماتیک فرمان‌های لازم به تجهیزات مختلف برای پخت و تولید گندله با کیفیت ایده‌آل و حداقل مصرف انرژی را صادر می‌کند. در صورتی‌که در سیستم کوره و شبکه امکان استفاده بهینه از سیستم هوشمند هدایت اتوماتیک قسمت‌های مختلف به سادگی سیستم زنجیر متحرک نیست.

فرآیند تولید سیمان



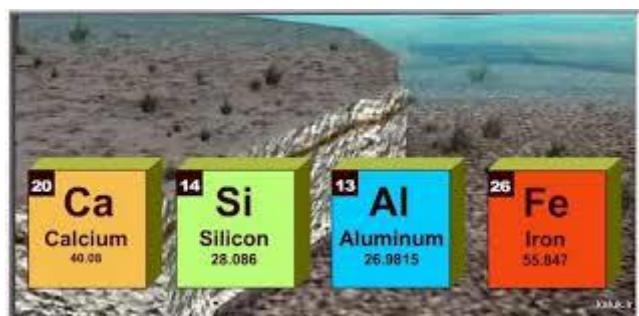
۳- فرآیند تولید سیمان

۱-۳- مقدمه

بیش از ۱۶۵ سال از شروع مصرف انبوه سیمان پرتلند می‌گذرد و هم اکنون بصورت یکی از مهمترین مصالح ساختمانی درآمده است. تولید و مصرف جهانی این فرآورده در سال ۱۹۸۶ از مرز یک میلیارد تن گذشت و در سال ۲۰۰۶ رقم ۲ میلیارد تن را پشت سر خواهد گذاشت. این ارقام به مفهوم اینست که سیمان به عنوان یک کالای صنعتی بالاترین رقم تولید را در میان تمام کالاهای صنعتی دیگر داراست و جالب اینکه سیمان اولین کالای صنعتی استاندارد شده آن هم در ۱۲۶ سال پیش است.

در تعریف سیمان گفته می‌شود که کلمه سیمان یعنی چسب و منظور از سیمان در مصالح ساختمانی چسبی است که در اثر ترکیب با آب قادر به چسباندن ذرات شن و ماسه (سنگدانه) است و پس از سفت و سخت شدن، در آب حل نمی‌شود. به همین خاطر به این سیمان، سیمان هیدرولیک گفته می‌شود و اساساً از اکسید کلسیم تشکیل شده است و این اکسید با اکسیدهای سیلسیم، آلومینیوم و آهن ترکیب می‌شود و ترکیبات مینرالی یا فازهایی با خاصیت سیمانی را به وجود می‌آورد. آشنایی بشر با ملاتها یا مصالحی که خاصیت هیدرولیکی (میل ترکیبی با آب) دارند، یا به عبارت دیگر ملاتهای آبی که پس از سخت شدن در آب حل نمی‌شوند، سابقه چند هزار ساله دارد، اما از حدود ۲۱۰ سال پیش بود که بررسیهای علمی و سیستماتیک روی اینگونه ملاتها و عوامل اصلی سیمانی بودن آنها شروع شد.

در ابتدای کار از کوره‌های مشابه کوره‌های آهکپزی برای تولید سیمان استفاده می‌شد و به دلیل استقبال زیاد از این کالای معجزه‌گر، در اوخر قرن نوزدهم کوره‌های دور ابداع شد و هم اکنون تکنولوژی به حدی است که با حداقل ممکن انرژی مصرفی و نیروی انسانی کوره‌هایی با ظرفیت ۱۰۰۰۰ تن در روز عرضه می‌شود.



شکل ۱-۳- ترکیبات اصلی سیمان.



شکل ۲-۳- کوره دوار مورد استفاده در صنعت سیمان.

۲-۳- ترکیبات سیمان (مواد اولیه برای تولید سیمان)

مواد اصلی به منظور تولید سیمان عبارتند از سنگ آهک و خاک رس (سیلیس و آلومین) که در طبیعت به وفور یافت می‌شوند ولی به شکلی نیستند که بتوان مستقیماً در تولید سیمان از آنها استفاده نمود.

سنگهای آهکی بیش از ۷۵ درصد CaCO_3 و سنگهای آهکی همراه با خاک رس بین ۴۰-۷۵ درصد CaCO_3 و خاکهای آهکی کمتر از ۴۰ درصد CaCO_3 دارند و از مخلوط این مواد می‌توان مخلوط لازم را برای تهیه سیمان به دست آورد.

۱-۲-۳- آهک زنده یا اکسید کلسیم (CaO)

آهک از مهمترین و اصلی‌ترین مواد مورد استفاده در ساخت سیمان است، اکسید کلسیم از پختن سنگ آهک یا کربنات کلسیم در حرارت حدود هزار درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. این عمل به طور جداگانه صورت نمی‌گیرد، بلکه در فرآیند تولید سیمان و در موقع حرارت دادن پودر مخلوط آهک و خاک رس ابتدا ذرات آهک (کربنات کلسیم) در حرارت حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد پخته شده و تبدیل به اکسید کلسیم و یا آهک زنده می‌شود. در این گرما آب شیمیایی خاک رس نیز از آن جدا می‌شود. در درجه حرارت بیشتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، اکسید کلسیم (آهک زنده) با اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم و آهن ترکیب شده و فازهای سیمان تشکیل می‌شوند.

۲-۲-۳- سیلیس (SiO_2)

این ماده که در اغلب سنگهای طبیعی یافت می‌شود یکی از مواد اصلی در ساخت سیمان پرتلند است. وقتی سیلیس حرارت داده می‌شود در ساختمان کریستالی آن یک سری تغییرات به وجود می‌آید. در کوره سیمان پزی در حدود ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد سیلیس با آهک ترکیب می‌شود و دو کلسیم سیلیکات تشکیل می‌شود. خاک رس معمولی دارای مقادیر

زیادی سیلیس است. میزان سیلیس مورد نیاز ۱۷ تا ۲۶ درصد وزن سیمان است و چنانچه نتوان این مقادیر را با استفاده از خاک رس معمولی فراهم نمود، می‌توان آن را با استفاده از سایر منابع تامین کرد.

(Al₂O₃) - ۳-۲-۳ - آلومینا

آلومینا، همان اکسید آلومینیوم خالص است که مقادیر زیادی از آن در خاک رس وجود دارد. خالص‌ترین نوع خاک رس، کائولینیت (Al₂O₃, 2SiO₂, 2H₂O) است که در آن آلومینا حدود ۴۰ درصد وزن مولکولی کل این ماده را دارد. آلومینا در سیمان پزی اثر کمک ذوب و در هنگام پخت سیمان، درجه حرارت پخت مواد خام را کاهش می‌دهد. از نظر شیمی سیمان، در اثر حرارت داخل کوره دور، با آهک ترکیب شده و تشکیل سه کلسیم آلومینات را می‌دهد. وجود این اکسید مرکب در داخل سیمان تولیدی، باعث می‌شود سیمان زودگیرتر شود و در هنگام ترکیب سیمان با آب حرارت بیشتری ایجاد گردد. ملات سیمانی که اکسید سه کلسیم آلومینات کمتر از ۵ درصد باشد، در برابر آب دریا و سایر آب‌های سولفات‌دار مقاوم است و تخریب نمی‌شود.

(Fe₂O₃) - ۴-۲-۳ - اکسید آهن

اکسید فریک نیز همانند آلومینا در سیمان پزی نقش کمک ذوب را دارد و باعث کاهش درجه حرارت پخت مواد خام در داخل کوره می‌شود. این اکسید در داخل کوره و در هنگام پخت، به همراه آلومینا با آهک ترکیب شده و تشکیل اکسید مرکب چهار کلسیم آلومینوفریت را می‌دهد. اکسید آهن زیاد گیرش سیمان را کندتر و رنگ سیمان را نیز تیره می‌کند، به همین دلیل برای ساخت سیمان سفید از این اکسید استفاده نمی‌شود. اکسید آهن جزء اصلی تشکیل دهنده اغلب سنگ آهن‌ها است، از این رو، اکسید فریک کم و بیش در اغلب کانیها خصوصاً خاک رس، و در اغلب مواد اولیه ساخت سیمان به طور اجتناب ناپذیر وجود دارد. در سیمان پرتلند تولیدی نیز اکسید مرکب آن به وجود می‌آید که رنگ سیمان را تیره می‌کند. سیمان سفید فاقد اکسید آهن است. به علاوه تولید سیمان فاقد اکسید آهن (سیمان سفید) مشکلاتی را به وجود آورده و هزینه تولید افزایش می‌یابد.

(MgO) - ۲-۳-۵ - اکسید منیزیم

این اکسید در فرآیند پخت، نقش کمک ذوب را ایفا می‌نماید و نباید از مقدار معینی (۵ درصد) بیشتر باشد، زیرا با سایر ترکیبات سیمان ترکیب و وارد فازهای سیمانی نمی‌شود و آزاد در سیمان باقی می‌ماند. نظر به اینکه MgO پس از گرفتن ملات سیمان خیلی به کندی با آب ترکیب گشته و شکفتگی منجر به انبساط حجمی می‌گردد. در نتیجه ترکهای مؤئی در ملات سیمان و بتن ایجاد می‌شود که در طول زمان باعث تخریب آنها می‌گردد. از این رو MgO در سیمان

نباید بیشتر از ۵٪ وزنی آن باشد. شایان ذکر است که کلینکر سیمان یک ماده هیدرولیکی است که حداقل دوسوم آن از کلسیم سیلیکات $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ یا $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ و بقیه شامل $(3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3)$ و $(4\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)$ و سایر ترکیبات می‌باشد. ضمناً نسبت CaO به SiO_2 باید حداقل ۲ باشد.

۳-۶- قلیائی‌ها

سدیم (Na) و پتاسیم (K) در سیمان نقش روانساز دارند، اگر مقدار آنها در سیمان زیاد باشد، تنظیم گیرش مختلف می‌گردد، بدین جهت مجموع این دو عنصر نباید از ۱ درصد وزن آن بیشتر گردد. مقدار کلر در کلیه سیمان‌ها به جهت نقش تخریبی آن در بتون، بایستی کمتر از ۰/۱ درصد وزنی آنها باشد.

مقدار قابل قبول اندیرد سولفوریک (SO_3) در سیمان پرتلند و در سیمان‌های روباره‌ای و پوزولانی بستگی به میزان سطح مخصوص (بلین) آنها دارد. اگر سطح مخصوص آنها بین ۴۰۰۰ الی ۲۰۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم باشد $3/5$ درصد وزنی سیمان است و اگر چنانچه سطح ویژه سیمان‌ها بیش از ۴۰۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم گردد، چهار درصد وزنی سیمان است. ضمناً خاطر نشان می‌گردد که سنگ آهن (Fe_2O_3) به عنوان کمک ذوب به مواد اولیه افزوده می‌گردد.

۳-۳- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان

همانطور که قبلاً گفته شد سیمان پودری است جاذب آب و چسباننده خرده سنگ (شن و ماسه) که از ترکیب و پختن و گداختن اکسید کلسیم با اکسیدهای نظری اکسید آلومینیوم، سیلیسیم، آهن، منیزیم و ... بدست می‌آید. با توجه به این تعریف و با توجه به انتظاری که از جنبه فیزیکی و کاربردی از سیمان و بتون حاصله مورد نیاز است، ایجاد می‌گردد که انواع و اقسام سیمان‌ها با خصوصیات کاربردی متفاوت ساخته شود. به عنوان مثال سیمان نوع یک یا سیمان معمولی دارای کاربرد در ساختمان‌سازی معمولی است. در ساختمان سدهای عظیم و اسکله‌ها که هر آن مورد تهاجم املاح موجود در آب می‌باشند، مصرف این نوع سیمان مصلحت نیست و از این رو از سیمان مخصوص یا سیمان دارای مقاومت شیمیایی بالا استفاده می‌شود. این سیمان علاوه بر دارا بودن مشخصات عمومی سیمان‌ها دارای مشخصه مقاومت شیمیایی در مقابل سولفاتها و مواد قلیائی موجود در آب و خاک نیز می‌باشد. با ذکر مجدد این که انواع گوناگون سیمان وجود دارد، به نوعی دیگر که به نام سیمان چاه نفت معروف است و مورد کاربرد در حفاری چاههای نفت دارد، اشاره می‌شود. این سیمان علاوه بر دارا بودن مشخصه‌های عمومی سیمان‌ها و مقاومت لازم در مقابل سولفاتها و قلیائیها دارای خصوصیات لازم جهت کاربرد در اعمق زمین که درجه حرارت و فشار بیش از حد متعارف است نیز می‌باشد. خوشبختانه با توجه به قدمت هفتاد و پنج ساله صنعت سیمان در ایران، هم اکنون کارخانجات سیمان ایران دارای قابلیت و تجربه لازم برای ساخت انواع سیمان‌ها هستند.

اجزاء اصلی تشکیل دهنده ترکیب سیمان عبارتند از اکسید کلسیم، اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیوم، اکسید آهن همچنین، اکسید منیزیم، اکسید پتاسیم و اکسید سدیم نیز در سیمان وجود دارند که مجموعاً درصد وزنی این اکسیدهای فرعی کمتر از ۵ درصد است. به خاطر وجود درجات حرارت بالا در منطقه پخت کوره، بخشی از این مواد به صورت مذاب در می‌آیند و در نتیجه در چنین محیطی اکسیدهای مذکور با یکدیگر ترکیب می‌گردند و ترکیبات چند تائی (چند اکسیدی) که موسوم به مینرال یا فازهای سیمان هستند پدید می‌آید.

البته آنچه که از کوره خارج می‌شود جسم تیره رنگ دانه ایست که موسوم به کیلنکر می‌باشد و اجزاء مینرال تشکیل دهنده آن عبارتند از:

۱) سه کلسیم سیلیکات $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ یا آلت (Alite)

(۲) دو کلسیم سیلیکات $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ یا بلیت (Belite)

(٣) سه کلسیم آلومینات $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ یا آلومینات (Alumina)

(٤) جما، کلسیم آلمینه فیت $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ با فیت

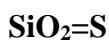
(Ferrite) چهار کلسیم آلومنیو فریت $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ یا فریت

همه اه با منزه های اصلی فوق تکیات دیگری نظر Na_2O , MgO , TiO_2

همراه با مینرال‌های اصلی فوق ترکیبات دیگری نظیر TiO_2 , MgO , Na_2O , K_2O , برخی اکسیدهای دیگر به مقدار جزئی وجود دارند که به صورت محلول جامد در شبکه کربستالی مینرالها (فازهای) فوق جای گرفته‌اند. خواص سیمان ناشی از ترکیب خواص اجزاء تشکیل دهنده آنست، ولی عمدۀ خواص آن مربوط به ترکیب موسوم به آلیت یا سه کلسیم سیلیکات می‌باشد. وجود ترکیباتی نظیر قلیائیها، آهک ترکیب نشده، اکسید منیزیم و امثال آن، غالباً منشا اثرات منفی روی خواص سیمان هستند. از جهتی وجود اینگونه ترکیبات باعث می‌شود که نقطه ذوب و پخت مواد خام سیمان پائین بیاید و در نتیجه عمل پختن با سهولت بیشتری صورت گیرد. از جهت دیگر، اینگونه ترکیبات دارای میل ترکیبی زیاد با آب افزایش حجم پیدا می‌کنند. بهمین خاطر وجود آنها باعث پائین آمدن مقاومت شیمیائی سیمان می‌گردد. در ادامه برخی خواص فازهای سیمان آورده شده است. ذکر این نکته لازم است که به خاطر اختصار و سهولت بیان و نوشتمن، اکسیدها و فازهای تشکیل دهنده سیمان را بصورت **جدول ۱-۳** نمایش می‌دهند.

جدول ۳-۱- ترکیبات اصلی سیمان پرتلند.

نام ترکیب	اکسیدهای ترکیب	علامت اختصاری
سه کلسیم سیلیکات	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₃ S
دو کلسیم سلیکات	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₂ S
سه کلسیم آلومنیات	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A
چهار کلسیم آلومنیوفریت	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C ₄ AF



۴-۳- فازهای موجود در سیمان

۴-۱- فاز آلیت ($\text{Ca}_3\text{Si}_4\text{O}_10$):

معمولًاً این ترکیب بصورت خالص در کلینکر وجود ندارد و اغلب همراه با ناخالصی متشکل از اکسیدهایی نظیر TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO_3 , Al_2O_3 می‌باشند که درصد آنها در فاز آلیت جماعتًا حدود ۲ درصد است. مقادیر هر یک از این اکسیدها در فاز آلیت بستگی به ترکیب کلینکر، درجه حرارت پخت و نحوه سرد کردن کلینکر دارد. وجود این اکسیدها باعث تغییر خواص آلیت می‌گردد و معمولًا مقاومت فشاری آن را بالا می‌برند. در پایینتر از حرارت ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، ممکن است سه کلسیم آلیت به آهک دو کلسیم سیلیکات تجزیه شود. این اتفاق در صورتی پیش می‌آید که عمل سرد کردن به آهستگی صورت گیرد. خصوصاً در شرایط احیاء کننده و وجود Fe^{2+} تجزیه فوق سریعتر صورت می‌گیرد. چه از نظر مقدار (درصد تشکیل دهنده) و چه از نظر تاثیر روی خواص سیمان، فاز آلیت دارای بیشترین سهم می‌باشد. خصوصاً اثر بارز این ترکیب تاثیر روی مقاومت سیمان است. برای بوجود آمدن این ترکیب بایستی حالت گداختی (زینتر شدن، Sintering) در منطقه پخت ایجاد شود. این فاز در دیاگرام $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ قرار دارد.

۴-۲- فاز بلیت ($\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_5$)

بلیت خالص در کلینکر سیمان یافت نمی‌شود و همراه با مقادیری از سایر اکسیدها می‌باشد. این ترکیب در ضمن پختن کلینکر و در حالت جامد تشکیل می‌گردد. در مواقعی که ضریب اشباع آهک (LSF) بالاست، مقادیر خیلی کمی از این ترکیب در کلینکر وجود خواهد داشت. گسترش و افزایش مقاومت بلیت آهسته است، اما در درازمدت تقریباً به مقاومت آلیت می‌رسد. کریستالی می‌دهد و از فرم معروف به بتا به فرم معروف به گاما تغییر شکل می‌دهد. در ابتدا بلیت بتا در مقایسه با نوع گاما پایدارتر است تغییر شکل کریستالی گاما به مقدار زیادی در کلینکر وجود دارد و نوع گاما دارای خاصیت هیدرولیکی نمی‌باشد. این تغییر شکل همراه با ۱۰ درصد افزایش حجمی کلینکر است. این از هم گسیختگی سریع کلینکر به نام افت کلینکر (Falling) موسوم است. از این تبدیل و افت کیفیت کلینکر می‌توان با اضافه کردن یون‌های خارجی و یا تسریع در سرد کردن کلینکر جلوگیری کرد. در حال حاضر با توجه به تکنولوژی موجود در صنعت سیمان عملاً مشکل افت کلینکر حذف شده است.

۳-۴-۳- فاز آلومینات (C_3A)

فاز آلومینات نیز مشابه دو فاز دیگر به همراه عناصر خارجی می‌باشد. در این فاز، اکسیدهای سدیم و پتاسیم قادرند تا حد ۵ درصد وزنی جای گیرند. خاصیت ترکیبی فاز آلومینات بسیار بالا می‌باشد و با حضور اکسیدهای قلیایی این میل ترکیبی شدیدتر می‌گردد.

بدلیل میل ترکیبی شدید فاز آلومینات با آب و برای جلوگیری از گیرش سریع سیمان، مقداری سنگ گچ (سولفات کلسیم) بعنوان عامل بازدارنده و کندکننده گیرش به سیمان افزوده می‌شود. گرمای هیدراتاسیون فاز آلومینات بسیار بالا می‌باشد و وجود آن در سیمان به همراه آلت و بلیت باعث افزایش مقاومت اولیه کلینکر می‌گردد. ولی خود به تنها بی دارای خواص هیدرولیکی چندانی نمی‌باشد و روی مقاومت نهائی تاثیر چندانی ندارد.

۴-۴-۳- فاز فریت (C_4AF)

فاز فریت دارای ترکیب مشخصی نمی‌باشد و ترکیب آن بستگی به مقدار آلومینیم و آهن موجود در کلینکر دارد. این فاز در محدوده بین C_2F و C_2A قرار دارد و می‌تواند شامل هر یک از ترکیبات C_6AF و C_4AF و C_6A_2F باشد. حدوداً ترکیب فاز فریت در کلینکر سیمان پرتلند نزدیک به C_6AF است. در این فاز اکسید عناصر دیگر نیز وجود دارد و رنگ سیمان وابسته به این فاز و مقدار آن می‌باشد. ($C_2(AF)$ خالص دارای رنگ قهوه‌ای، $C_2(AF)$ به همراه MgO دارای رنگ خاکستری سیر یا سبز می‌باشد. این فاز میل ترکیبی کمی دارد و نقش هیدرولیکی چندانی در سیمان ندارد.

۴-۵- ترکیبات فرعی

این ترکیبات شامل انواعی از اکسیدها نظیر: قلیائیها، اکسید منیزیم، سولفات‌ها و امثال آن می‌باشد. قلیائیها از جمله ترکیبات فراوان و پراکنده در طبیعت می‌باشد. و لذا از طریق مواد خام وارد فازهای کلینکر می‌گردند. در ضمن عمل پخت، مقدار قابل توجهی از قلیائیها از سیستم پخت خارج می‌شوند. درصد قلیائیها در سیمان در فاصله $0/5$ تا $1/3$ درصد است که در سیمانهای دارای قلیائی پایین مقدار قلیائی کل بر مبنای معادل اکسید سدیم باید کمتر از $0/6$ درصد باشد. اکسید سدیم به صورت محلول جامد و به مقدار حدود $0/3$ درصد وارد شبکه کریستالی C_3S می‌شوند. همچنین O , MgO , K_2O , CaO_{Free} (آهک آزاد) نیز همانند Na_2O وارد شبکه کریستالی C_2S و C_3S می‌شوند.

سولفات‌ها از طریق مواد اولیه (خاک رس) و سوخت وارد فازهای کلینکر می‌گردند. ترکیبات گوگرد ممکن است به صورت سولفات‌قلیائی و یا ترکیبات نظیر $CaO \cdot Al_2O_3$, $CaSO_4 \cdot 2(CaO \cdot SiO_2)$ و یا $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 3$ در فازهای کلینکر و به صورت

محلول جامد (Solid solution) وجود داشته باشند. یونهای سولفات بر خلاف یون‌های فسفات باعث تجزیه C_3S نمی‌شوند، ولی وجود سولفات به همراه آلمینا باعث تجزیه C_3S بتا می‌شوند. وجود MgO در سیمان باعث خنثی کردن اثر آلمینا و سولفات‌بر روی تجزیه C_3S می‌گردد.

اکسید تیتان به مقدار جزئی ($2/0$ تا $0/3$ درصد) در تمام سیمان‌های پرتلند وجود دارد. در سیمان آلمینائی مقدار آن بالاتر است ($1/5$ تا 2 درصد). وجود مقادیر کم این اکسید باعث افزایش مقاومت سیمان می‌شود و مقادیر بالای آن (در حد $4/5$ درصد) باعث افت فشار می‌گردد. اکسید تیتان در کلینکر سرد شده سیمان پرتلند به صورت C_3T_2 وجود دارد. در حدود $0/2$ درصد پنتا کسید فسفر P_2O_5 در سیمان پرتلند وجود دارد. وجود اکسید فسفر در سیمان باعث تجزیه C_3S و تولید C_2S و آهک آزاد می‌گردد. از این رو مقادیر بالای پنتا کسید فسفر (در حدود $2/5$ درصد)، باعث افت مقاومت سیمان خواهد شد.

کریستالهای ریز و پراکنده پریکلاز دارای اثر تخریبی کمتری هستند. در صورتیکه دانه‌های کریستال پریکلاز درشت باشد و یا اینکه به صورت مجتمع در گودال‌هایی (Pockets) جمع شده باشند، دارای اثر تخریبی (انبساط حجمی) بیشتری در مقایسه با مقدار (وزنی) مشابه کریستالهای ریز و پراکنده می‌باشد. نکته فوق در مورد آهک آزاد نیز صادق است. انبساط حجمی آهک آزاد ناشی از آهسته شکفته شدن آن است که همان ترکیب آهک با آب تشکیل هیدروکسید کلسیم₂ $Ca(OH)_2$ می‌باشد. این ترکیب دارای حجمی معادل ده برابر آهک تشکیل دهنده آن است. بطور مشابه انبساط حجمی منیزی نیز ناشی از ترکیب آن با آب می‌باشد. فعل و انفعال شکفته شدن آهک آزاد و منیزی در سیمان معرف ناسالم بودن و معیوب بودن سیمان (میزان انبساط ملات یا بتن) است که اصطلاحاً بدان (Unsoundness) می‌گویند.

در **جدول ۳** درصد وزنی هر یک از اکسیدهای موجود در فازها و مشخصات عمومی فازهای کلینکر ذکر شده است. غالباً کلینکر سیمان حاوی آهک آزاد و یا CaO ترکیب نشده می‌باشد. وجود آهک می‌تواند به علت وجود یکی از عوامل زیر باشد:

- ۱) آماده سازی مواد خوب انجام نشده باشد: مواد یا زبر است یا اینکه خوب همگن نشده است.
- ۲) سرعت سرد کردن در خنک کن کوره پایین باشد: در نتیجه مقداری از C_2S به C_3S تجزیه شده باشند.
- ۳) درصد آهک (تیتراسیون) بالا باشد ($L.St III > 100$)
- ۴) مواد خوب پخته نشده باشد: آهک فرصت ترکیب با سایر اکسیدها را نداشته است.

جدول ۲-۳- درصد وزنی هر یک از اکسیدهای موجود در فازها و مشخصات عمومی فازهای کلینکر.

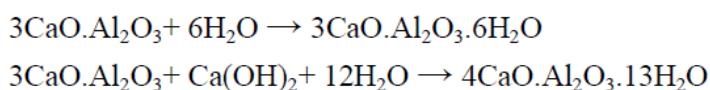
فاز قریب	فاز آلومنیات	فاز بلیت	فاز آلت	اکسید
۵۱/۴	۵۶/۵	۵۳/۲	۵۹/۷	CaO
۲/۲۸	۴/۲۱	۴/۱/۵	۴/۶/۹	SiO ₂
۱۹/۴	۲۷/۵۲	۱/۸/۴	۱/۱/۲	Al ₂ O ₃
۲۲/۵۲	۵/۷۶	۰/۹/۶	۰/۰/۶	Fe ₂ O ₃
۴/۱۸	۰/۸/۵	۰/۴/۸	۰/۸/۹	MgO
-	۰/۰/۶	۰/۷/۵	۰/۱/۹	K ₂ O
-	۰/۲/۵	۰/۱/۶	۰/۰/۶	Na ₂ O
۱/۶	۰/۴/۸	۰/۶/۴	۰/۱/۶	TiO ₂
-	-	۰/۲/۸	-	P ₂ O ₅

وجود آهک آزاد در سیمان مطلوب نیست و مقدار آن بایستی کمتر از ۲/۵ درصد باشد. حضور آن باعث انبساط حجمی (ناسالم بودن سیمان) بتن و ملات می‌شود.

همچنین در کلینکر ترکیب MgO (اکسید منیزیم به فرم مکعبی را پریکلاز گویند) نیز وجود دارد. این ترکیب معمولاً به صورت محلول جامد وارد شبکه کریستالی سایر فازها می‌شود. درصد مجاز MgO در کلینکر کمتر از ۵٪ است. و بالاتر از این ارقام مترادف با ناسالم بودن سیمان است. نسبت اکسید منیزیم ترکیب شده با سایر فازها، به اکسید منیزیم حل شده بستگی به ترکیب شیمیایی کلینکر دارد. وجود پریکلاز در سیمان باعث ناسالم بودن سیمان و انبساط حجمی (Magnesia Expansion) ملات و بتن می‌گردد.

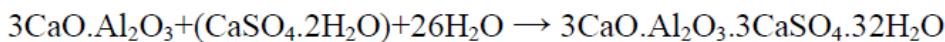
۳-۴-۶- سنگ گچ

بطوریکه بیان گردید، یکی از مینرالهای موجود در کلینکر سیمان، فاز سه کلسیم آلومنیات (C₃A) است. این فاز دارای میل ترکیبی شدیدی با آب و آهک هیدراته می‌باشد. بدین صورت:



آهک هیدراته از هیدراته شدن کلسیم سیلیکات‌های موجود در کلینکر (آلیت و بلیت)، حاصل می‌شود. بطوریکه ملاحظه می‌گردد هیدراته شدن سریع C₃A به معنی جذب مقدار زیادی آب در فاصله زمانی کم است که نتیجه این جذب سریع سیمان و سفت شدن آن می‌باشد و در نتیجه در کارهای بتنی و ساختمان فرصت لازم برای کار با ملات یا بتن وجود نخواهد داشت.

عمده‌ترین دلیل افزودن گچ خام به کلینکر سیمان، کنترل گیرش سیمان یا در حقیقت کنترل سرعت هیدراته شدن آلومینات موجود در سیمان می‌باشد. عبارت دیگر گچ خام نقش به تاخیر انداختن گیرش را بازی می‌کند. علت آن هم اینست که فاز آلومینات دارای میل ترکیبی با گچ خام است. در حضور گچ خام فعل و انفعال هیدراته به صورت زیر است:



کریستال حاصله در فرمول فوق به نام سه سولفات یا اترینجیت (Ettringite-trisulfate) موسوم است. اولاً این کریستال دارای حجمی معادل ۸ برابر حجم آلومینات اولیه است، ثانیاً کریستالهای آن در مقایسه با کریستالهای آلومینات، بسیار ریزتر و پراکنده‌تر می‌باشند، ثالثاً این کریستال نوظهور به صورت قشر نازکی روی سایر ذرات موجود در سیمان را می‌پوشاند و برای چند ساعت اولیه عمل هیدراتاسیون، مانع از رسیدن سریع آب به سایر ذرات می‌شود، در نتیجه از سفت شدن سریع سیمان جلوگیری می‌گردد. نقش دیگر لایه نازک کریستال سه سولفات اینست که لغزش را تسريع می‌کند. این خاصیت بدین معنی است که شکل‌پذیری و خاصیت پلاستیکی را در سیمان افزایش می‌دهد.

پس از مراحل فوق کریستالهای اترینجیت به صورت سوزنی شکل (رشته‌ای) شروع به رشد می‌نماید. در نتیجه از حالت غشاء (پوشش ذرات دیگر سیمان) بیرون می‌آید و آب محصور شده در فاصله بین این غشاء و سایر ذرات سیمان، فرست تماش با سایر ذرات و ترکیب با آنها و در نتیجه هیدراته کردن سایر ذرات را پیدا می‌کند. از این مرحله به بعد است که گیرش سیمان شروع می‌شود. با گذشت زمان کریستالهای سه سولفات نیز به کریستالهای یک سولفات تبدیل می‌گردند.

مقدار سولفاتی (گچ خام) که می‌بایستی به سیمان افزوده شود، باید آنچنان باشد که جوابگوی مصرف واکنش مذکور باشد. افزودن مقدار اضافی سولفات دارای عوارض سوئی است که از جمله آنها انبساط حجمی بیش از حد مجاز بتن و ملات سیمان می‌باشد. از این روست که در استانداردهای مختلف مقدار گچ مصرفی متناسب با C_3A موجود در سیمان است. معمولاً درصد گچی که همراه با کلینکر در آسیای سیمان مصرف می‌شود بین ۳ تا ۵ درصد است.

لازم به ذکر است که سنگ گچ به منظور جلوگیری از گیرش سریع و فوری سیمان و کنترل زمان آن اضافه می‌شود.

۳-۵-۳- روشهای تولید سیمان

براساس طبقه‌بندی بین‌المللی، صنعت سیمان جزء گروه صنایع کانی غیرفلزی محسوب می‌شود. اصولاً سه روش برای تولید سیمان وجود دارد:

۱) روش تر

۲) روش نیمه تر

۳) روش خشک

نوع این روشها بستگی به مواد خام ورودی به کوره از نظر غلظت و میزان آب اضافه شده به آنها دارد. مهمترین و پرکاربردترین روش تولید سیمان در جهان روش خشک است. سیستم پخت اکثر کارخانه‌های سیمان کشور ما نیز براین روش استوار است.

در فرآیند نخست (تر) مواد خام بطور مرطوب و به حالت دوغاب بداخل کوره تغذیه می‌گردد. در فرآیند تولید سیمان به صورت خشک، مواد خام خشک، آسیا شده و به صورت پودر خشک به درون کوره تغذیه می‌شود. خط تولید سیمان از معدن شروع به صورت خشک آسیا شده و سپس گرانول یا گویچه‌های حاصل به درون کوره تغذیه می‌شود. خط تولید سیمان از معدن شروع و به بارگیرخانه و بسته‌بندی سیمان خاتمه می‌یابد. در تولید سیمان به روش نخست مواد خام و اولیه نظیر سنگ آهک، خاک رس، مارل (خاک آهکدار)، سنگ گچ، سنگ آهن و سنگ سیلیس از معادن استخراج می‌گردند. در استخراج موادی نظیر سنگ آهک، سنگ آهن و سنگ گچ ممکن است نیاز به چالزنی و ایجاد انفجار بوسیله دینامیت و مواد منفجره باشد. موادی نظیر خاک رس و مارل (خاک آهکدار) نیاز به چالزنی و انفجار ندارد و صرفاً از بولدوزرها و یا دستگاه‌های مشابه جهت دپو کردن مواد استفاده می‌شود.

روشهای مختلفی برای تولید سیمان‌های مختلف وجود دارد. تکنولوژی مورد استفاده برای تولید سیمان به مرور دستخوش تحول و پیشرفت بوده است. هم‌اکنون صنعت سیمان با برخورداری از آخرین تکنیکهای اعجاب‌انگیز، با استفاده از روش خشک و به کمک سیستم‌های اتوماتیک، شاهد پیشرفت‌های شگرف در طول تاریخ ۱۶۰ ساله تولید صنعتی خود می‌باشد.

چهار مرحله اصلی در تولید سیمان وجود دارد (روش خشک):

- ۱) خرد کردن و آسیا کردن مواد خام،
- ۲) ترکیب مواد به نسبت مناسب،
- ۳) پخت مخلوط تهیه شده در کوره (سیستم پخت)،
- ۴) آسیا کردن (نرم کردن) محصول پخته شده که به "کلینکر" معروف است.

۳-۶-۳- شرح مراحل تولید سیمان

۳-۶-۱- مواد اولیه

مواد اولیه مورد استفاده در صنعت سیمان معمولاً سنگ آهک و خاک رس است که پس از استخراج بوسیله کامیون (یا در مواردی بوسیله واگن، کشتی، نوار نقاله و...) به محل کارخانه و به قسمت سنگ‌شکن حمل می‌شوند. خاک و سنگ آهک بصورت جداگانه از خردکن عبور کرده و خرد می‌گردد. در سنگ شکن که مخصوص خرد کردن سنگ‌های تا ابعاد دو متر می‌باشد،

سنگ خرد (شکسته) شده و بستگی به نوع سنگ شکن و آسیا مواد ابعاد آن به کمتر از ۸ سانتیمتر تقلیل می‌یابد. در مواردی سنگ آهک بصورت قلوه سنگ همراه با خاک می‌باشد که به این مخلوط طبیعی آلوویوم یا مارل می‌گویند. در این مورد نیز لازم است که مواد از سنگ شکن عبور نماید.



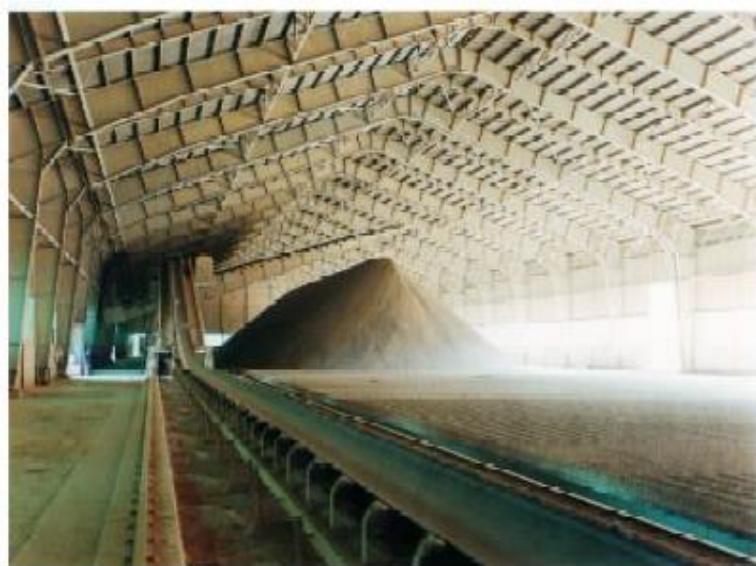
شکل ۳-۳- معدن مواد اولیه سیمان.



شکل ۳-۴- انفجار سینه کار در معدن مواد اولیه سیمان.

۳-۶- سالن مواد

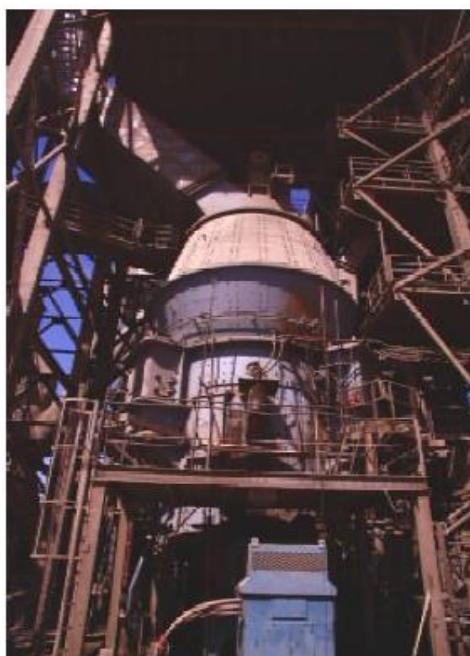
پس از خرد شدن سنگ آهک و آماده شدن خاک، این دو در یک سالن با یکدیگر مخلوط می‌شوند و یا در دو سالن جداگانه ریخته می‌شوند و سپس به نسبت لازم قبل از ورود به آسیا مواد با یکدیگر مخلوط می‌گردند. ممکن است به مخلوط حاصله مواد اولیه دیگری نظیر سنگ آهن به منظور کمک ذوب یا سنگ سیلیس جهت تصحیح و تنظیم ترکیب شیمیائی مواد برای ساخت سیمان ضد سولفات اضافه شود که این عمل می‌تواند هم در سالن مواد صورت گیرد و هم اینکه مواد اولیه اصلی در قیفها و سیستم توزین وارد آسیا مواد شوند.



شکل ۳-۵- سالن تنظیم و هموژنیزاسیون مواد.

۳-۶-۳- آسیای مواد

آسیای مواد انواع مختلفی دارد و در خط تولید مورد بحث از نوع گلوله‌ای می‌باشد. اصولاً در آسیای مواد، مواد اولیه خرد شده به نسبتها لازم وارد آسیا می‌شوند و سپس بصورت پودر، با رطوبت کمتر از موقع ورود، از آسیا خارج می‌گردند. آنچه که از آسیا مواد خارج می‌شود بنام مواد خام یا خوارک کوره نیز موسوم است. آسیای مواد مجهز به کوره هوای گرم برای گرفتن رطوبت مواد می‌باشد، غالباً از گازهای گرم خروجی از کوره برای این منظور استفاده می‌شود.



شکل ۳-۶-۳- آسیای غلتکی.

۳-۶-۴- غبارگیر

بمنظور خشک کردن و جابجائی مواد در آسیای مواد از گازهای خروجی از کوره استفاده می‌شود. این گازها پس از انتقال مواد از آسیا موارد الکترو فیلتر گشته و ذرات مواد و گرد و غبار از آن جدا می‌گردد و سپس از طریق دودکش به خارج (محیط اطراف) فرستاده می‌شود.



شکل ۷-۳- سیستم غبارگیری.

۳-۶-۵- سیلوهای ذخیره مواد

مواد پودر شده پس از خروج از آسیا، وارد سیلوهای مخلوط کن و ذخیره‌سازی می‌شود و پس از نمونه‌گیری و آزمایشات لازمه توسط آزمایشگاه و اطمینان از تنظیم بودن و متناسب بودن ترکیب مواد خام، هموژن می‌گردد و سپس به سیلوهای ذخیره خوراک فرستاده می‌شود. در خط تولید مورد بحث فقط یک سیلو از نوع جریان پیوسته به ظرفیت ۲۵۰۰۰ تن (در یک مورد خاص) منظور شده است. در این قسمت مواد ذخیره شده آماده مصرف در کوره می‌باشد.



شکل ۳-۸- سیلوهای ذخیره مواد.

۳-۶-۶- کوره و پیش گرمکن

مواد خام از قسمت بالای پیش گرمکن وارد سیستم پخت می‌شود و پس از عبور پیش گرمکن و کلساینر وارد کوره دوار می‌گردد. مواد خام در پیش گرمکن به مرور (در فاصله حدود ۵۰ ثانیه) خشک، گرم و کلسینه می‌شود. پیش گرمکن دارای دو برج است که در یکی از آنها کلساینر دارد.

مواد پس از تکلیس وارد کوره شده و نهایتاً بصورت دانه‌های کلینکر از کوره خارج می‌گردد. سیستم پخت متشكل از پیش گرمکن، کلساینر، کanal هوای سوم، کوره دوار، خنک کن و دستگاه جداسازی قلیائی (کنارگذر) می‌باشد. در ادامه ارقام و اطلاعات زیادی ارائه شده است و مقادیر مواد، گاز، هوا، سوخت، کلینکر و ... همگی بر مبنای یک کیلوگرم می‌باشند.

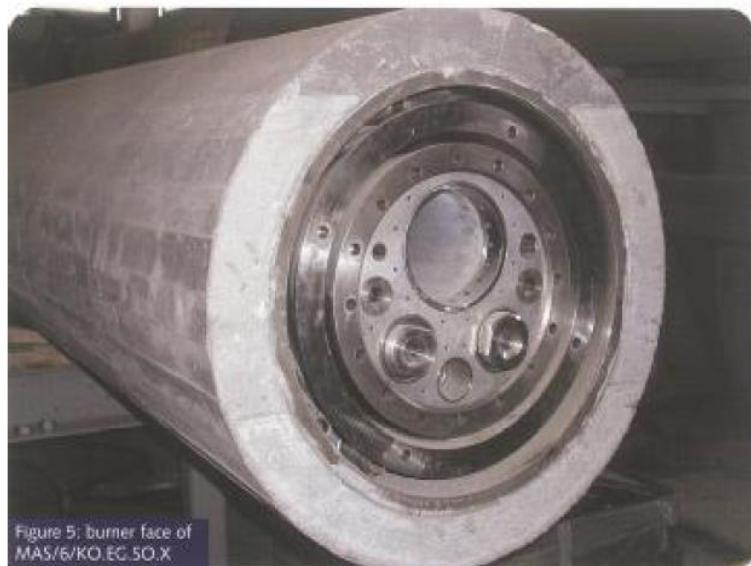
مقدار ۱/۶۸ کیلوگرم مواد با درجه حرارت ۵۰ درجه سانتی گراد وارد پیش گرمکن می‌شود و پس از طی مسیر سیکلون‌ها، کلساینر، کوره و خنک کن، بصورت کلینکر با وزن یک کیلوگرم و درجه حرارت ۸۰ سانتی گراد خارج می‌شود. مقدار هوای ورودی به خنک کن ۲/۳ متر مکعب است که ۰/۳۶ متر مکعب آن بعنوان هوای ثانویه، ۰/۵۴ متر مکعب آن بعنوان هوای سوم (میانی-ثالثیه) و ۱/۴ متر مکعب آن به صورت هوای اضافی از خنک کن خارج می‌شود. ۴۰ درصد سوخت مصرفی در مشعل اصلی کوره و ۶۰ درصد آن در کلساینر مصرف می‌شود. درصد تکلیس مواد در کلساینر ۹۰ درصد است. درجه حرارت کلینکر خروجی از کوره ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد، گازهای خروجی از کوره ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد، گازهای خروجی از سیکلون‌ها بترتیب ۸۷۰ و ۷۵۰ و ۵۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتی گراد می‌باشند. درصد اکسیژن گازهای عقب کوره ۲ درصد است و حاوی مقدار قابل توجهی مواد قلیائی هستند. مقدار ۰/۳۲ متر مکعب از گازهای خروجی از کوره وارد دستگاه جداسازی مواد قلیائی یا کنارگذر (Alkaly) شده و مقدار ۰/۰۲ کیلوگرم مواد قلیائی از آن جدا می‌گردد. در این دستگاه ۰/۵۴ متر مکعب هوای محیط برای پائین آوردن درجه حرارت گازهای خروجی از کوره و انجام بخارات مواد قلیائی استفاده می‌شود. مقدار گازهای خروجی از پیش گرمکن به سمت آسیای مواد ۱/۳۴ متر مکعب است و با درجه حرارت ۳۵۰ درجه سانتی گراد حاوی ۰/۱ کیلوگرم مواد برگشتی می‌باشد.



شکل ۳-۹- کوره دوار با پیش گرمکن سیکلونی.



شکل ۳-۱۰- کوره دوار با خنک کن ساتلاتیتی در انتهای آن.



شکل ۳-۱۱- مشعل کوره دوار سیمان.

۳-۶-۷- خنک کن کلینکر

درجه حرارت کلینکر خروجی از کوره حدود 130°C درجه سانتی گراد است و این مقدار حرارت موجود در کلینکر بوسیله جریان هوای سرد بازیابی می شود. سپس کلینکر خنک شده (تا حدود 100°C درجه سانتی گراد) راهی انبار کلینکر می گردد. بخشی از هوای گرم شده از طریق کانال هوای سوم بسمت کلساینر می رود و بخشی دیگر وارد کوره می شود و اکسیژن مورد نیاز سوخت را تامین می کند.



شکل ۱۲-۳ - خنک کن کلینکر.

۳-۶-۸- خرد کن و قیف سنگ گچ

به کلینکر خروجی از کوره حدود ۴ درصد سنگ گچ افزوده می‌شود و سپس در آسیای سیمان پودر می‌گردد. قبل از سنگ گچ (گچ خام) در خرد کن جداگانه‌ای به اندازه‌های کمتر از ۴ سانتیمتر خرد شده و سپس در قیف مربوطه ذخیره شده است. سرعت ترکیب پودر کلینکر با آب بسیار شدید است و بهمین خاطر از سنگ گچ برای کنترل این ترکیب و گیرش سیمان استفاده می‌شود.

۳-۶-۹- آسیای سیمان

از طریق دو نوار تغذیه مجہز به سیستم توزین، سنگ گچ خرد شده و کلینکر وارد آسیای سیمان (گلوله‌ای) می‌شوند و پس از پودر شدن، پودر حاصله (سیمان) از طریق بالابر کاسه‌ای و هوائی (الواتور و ایرلیفت) به سیلوهای ذخیره سیمان فرستاده می‌شود. در دهه اخیر استفاده از آسیاهای غلتکی برای پودر کردن کلینکر و تولید سیمان مرسوم شده است؛ از جمله در پروژه‌های سیمان تهران و فراز فیروزکوه برای دپارتمان آسیای سیمان، آسیاهای غلتکی خریداری شده است.



شکل ۱۳-۳- آسیای سیمان (گلوله‌ای).

۳-۶-۱۰- سیلوهای سیمان و بارگیرخانه

با توجه به ظرفیت تولید کارخانه، تعدادی سیلوی بتنی جهت ذخیره سیمان در نظر گرفته می‌شود. سپس سیمان به کمک دستگاه‌های بارگیری سیمان فله یا بسته‌بندی و پر شدن در کيسه بارگیری شده و از کارخانه صادر می‌گردد. وسیله حمل سیمان از کارخانه می‌تواند کامیون، واگن، قطار و یا کشتی باشد. چگونگی حمل بستگی به موقعیت کارخانه و محل مصرف دارد.



شکل ۱۴-۳- بارگیری کيسه.



شکل ۳-۱۵- بارگیری فله.

۳-۷- انواع سیمان

سیمان انواع مختلفی دارد که عبارتند از:

- ۱) سیمان پرتلند تیپ I،
- ۲) سیمان پرتلند تیپ II،
- ۳) سیمان پرتلند تیپ III،
- ۴) سیمان پرتلند تیپ IV،
- ۵) سیمان پرتلند تیپ V،
- ۶) سیمان پوزولان،
- ۷) سیمان آمیخته،
- ۸) سیمان برقی (پرآلومین)،
- ۹) سیمان رنگی،
- ۱۰) سیمان سفید،
- ۱۱) سیمان سربارهای ضد سولفات،
- ۱۲) سیمان پرتلند آهکی،

۱۳) سیمان بنائی،

۱۴) سیمان نسوز،

۱۵) سیمان چاه نفت،

۱۶) سیمان پرتلند ضدآب،

۱۷) سیمان باگیرش تنظیم شده،

۱-۷-۳- سیمان پرتلند

سیمان پرتلند طبق تعریف ASTM C 150، نوعی سیمان هیدرولیک است که از پودر کردن کلینکری که عمدتاً از اکسیدهای سیلیسی، آلومینیومی و آهنی که عامل تشکیل ترکیبات سیلیکاتی و آلومیناتی سیمان پرتلند می‌باشد، بدست می‌آید.

۱-۷-۳- اندواع سیمان پرتلند

استاندارد AASHTO M 85 و ASTM C 150 مشخصات ۸ نوع مختلف سیمان پرتلند را برای کاربردهای مختلف آورده‌اند.

جدول ۳-۳- اندواع سیمان پرتلند و کاربرد آنها.

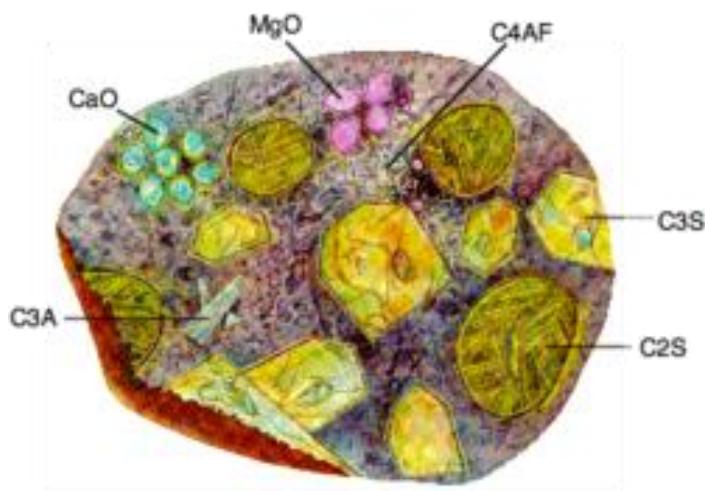
نوع سیمان پرتلند	کاربرد
I	پرتلند معمولی
II	پرتلند اصلاح شده (دارای مقاومت متوسط در برابر سولفات‌ها)
III	پرتلند زودگیر (دارای استحکام اولیه بالا) این نوع سیمان زودگیر بوده دارای مقاومت اولیه زیادی است مقاومت سه روزه آن معادل ۷ روزه نوع ۱ است. در جاهایی که بخواهند به زودی از ساختمان بهره‌برداری کنند و یا زودتر از موعد مقرر احتیاج به قالب برداری باشد یا برای بتن‌ریزی در هوای سرد از آن استفاده می‌کنند، زیرا این سیمان هنگام گرفتن گرمای بیشتری نسبت به نوع ۱ پس می‌دهد.
IV	پرتلند با گرمایی کم (دارای گرمای هیدراتاسیون پایین) این نوع سیمان به سیمان (کندگیر) معروف است. حتی از نوع ۲ هم کمتر حرارت تولید می‌کند و دیرگیرتر از انواع دیگر است. این سیمان در بتن‌ریزی‌های حجیم مانند سدهای وزنی مصرف می‌شود.
V	پرتلند مقاوم در برابر سولفات‌ها (دارای مقاومت خوب در برابر سولفات‌ها) این نوع سیمان به سیمان ضد سولفات‌نیز معروف است و در سازه‌های دریابی و زمین‌های سولفات‌دار مصرف می‌گردد. مقاومت این سیمان در زمان طولانی‌تری نسبت به نوع ۱ به دست می‌آید و گرمایی کم تری نیز دارد.
IA	نوع ۱ به همراه عامل هوادهندۀ
IIA	نوع ۲ به همراه عامل هوادهندۀ
IIIA	نوع ۳ به همراه عامل هوادهندۀ

۳-۱-۷-۳- فازهای اصلی تشکیل دهنده سیمان پرتلند

سیمان پرتلند از فازهای مختلفی تشکیل شده است که عبارتند از:

- تری کلسیم سیلیکات (آلیت) (C_3S) ۷۵-۲۰ درصد
- دی کلسیم سیلیکات (بلیت) (C_2S) ۴۶-۱۵ درصد
- تری کلسیم آلومنیات (C_3A) ۱۳-۴ درصد
- تترا کلسیم آلومنیوفریت (C_4AF) ۱۲-۸ درصد است.

نسبت این فازها بسته به نوع و کاربرد سیمان متغیر است.



شکل ۳-۱۶-۳- تصویر شماتیک سطح مقطع یک دانه سیمان.

۳-۱-۷-۴- اکسیدهای تشکیل دهنده سیمان پرتلند

- اکسید کلسیم ۶۰ تا ۶۷ درصد ترکیبات سیمان را تشکیل می‌دهد.
- اکسید سیلیسیم •
- اکسید آلومنیوم •
- اکسید آهن •
- اکسید منیزیم •

- اکسید گوگرد که معمولاً به جای سنگ گچ، سولفات مورد نیاز ترا کلسیم آلومینو فریت را برای تشکیل سولفو فریت کلسیم به منظور تسهیل هیدراتاسیون سیمان، تامین می‌کند. (برای پایین آوردن میزان پسماند نامحلول که توسط اسید کلریدریک مشخص می‌شود از این ترکیب به جای سنگ گچ استفاده می‌شود).
- قلیایی‌های سیمان: شامل اکسید پتاسیم و اکسید سدیم می‌باشد که با پاره‌ای از مواد سنگی در بتن ترکیب شده و سبب خرابی بتن و تغییر در میزان افزایش مقاومت آن می‌شوند. در نتیجه مقدار کم این ترکیبات نیز بایستی کنترل و به آن اهمیت داده شود.

۳-۷-۵- افزودنی‌ها (که بعد از تولید کلینکر سیمان به آن اضافه می‌شود)

- سولفات کلسیم: این ترکیب حداکثر به میزان ۳ درصد وزنی در سیمان پرتلند استفاده می‌شود، این ماده با تراکلسیم آلومینوفریت ترکیب شده و مقدار کمی سولفوفریت کلسیم ایجاد می‌کند که این ماده هیدراتاسیون سیلیکات‌ها را تسريع می‌کند. ضمناً تماس این سولفات با ترکیب تری آلمینات کلسیم موجب ایجاد سولفو آلمینات کلسیم (اترینگایت) می‌شود که موجب افزایش حجم ملات می‌گردد. این افزایش حجم در هنگامی که ملات در حالت خمیری است بی ضرر است، اما در صورتی که پس از گیرش ملات ایجاد شود باعث ایجاد سلسله ترک‌های متوالی و تخرب بتن می‌گردد. در نتیجه میزان سنگ گچی که به سیمان اضافه می‌شود بسیار مهم بوده و بستگی به میزان تری آلمینات کلسیم و قلیایی‌های سیمان دارد. افزایش سنگ گچ بنوبه خود سبب انبساط بیش از حد و خرابی سیمان سخت شده می‌گردد. میزان بهینه سنگ گچ بر اساس حرارت ایجاد شده از فعل و انفعالات سیمان تعیین می‌شود، و پیشرفت مناسب فعل و انفعالات ما را مطمئن می‌سازد که وقتی همه سنگ گچ ترکیب می‌شود مقدار کمی تری آلمینات کلسیم باقی می‌ماند. آزمایش مشخصی جهت نشان دادن عدم سلامت سیمان به علت وجود سولفات کلسیم اضافی وجود ندارد ولی مقدار آن با روش تجزیه شیمیایی به آسانی قابل محاسبه است. استاندارد BS 12 مقدار مناسب سنگ گچ را به صورت میزان SO_3 موجود توصیه می‌کند.

• انواع افزودنی‌های شیمیایی که به سه گروه اصلی زیر تقسیم می‌شوند:

- ۱- تندگیر کننده‌ها که ترکیباتی هستند مانند کلرور کلسیم، کربنات سدیم، کلرور آلمینیوم، کربنات پتاسیم، فلوئورور سدیم، آلمینات سدیم و نمک‌های آهن.
- ۲- کندگیر کننده‌ها: نظیر مشتقات هیدروکربنی نمک‌های محلول روی، شکر و برانهای محلول.
- ۳- تقلیل دهنگان آب: نظیر اسید هیدروکسی کربوکسیلیک و اسید لیگنوسولفونیک.

۳-۷-۱-۶- اینمنی

سیمان پرتلند خورنده است. تماس آن با چشم، پوست و دستگاه تنفسی باعث ایجاد ناراحتی می‌شود. در مورد چشم این امر ممکن است موجب سوزش شیمیایی و حتی در موارد شدیدتر منجر به کوری شود. تماس مکرر و دراز مدت آن با پوست موجب آماز می‌شود.

- آمار و اطلاعاتی در مورد تولید سیمان در جهان

<http://www.irancement.com/>

<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>

World Production and Capacity:

	Cement production		Clinker capacity	
	2013 ^e	2014 ^e	2013 ^e	2014 ^e
United States (includes Puerto Rico)	77,400	83,300	104,300	104,300
Brazil	70,000	72,000	60,000	60,000
China	2,420,000	2,500,000	1,900,000	2,000,000
Egypt	50,000	50,000	46,000	46,000
Germany	31,300	31,000	31,000	31,000
India	280,000	280,000	280,000	280,000
Indonesia	56,000	60,000	51,000	50,000
Iran	72,000	75,000	80,000	80,000
Italy	22,000	22,000	46,000	46,000
Japan	57,400	58,000	55,000	55,000
Korea, Republic of	47,300	47,700	50,000	50,000
Mexico	34,600	35,000	42,000	42,000
Pakistan	31,000	32,000	43,400	44,000
Russia	66,400	69,000	80,000	80,000
Saudi Arabia	57,000	63,000	55,000	55,000
Thailand	42,000	42,000	50,000	50,000
Turkey	71,300	75,000	68,500	69,000
Vietnam	58,000	60,000	80,000	80,000
Other countries (rounded)	536,000	525,000	348,000	349,000
World total (rounded)	4,080,000	4,180,000	3,470,000	3,570,000

منابع و مراجع بخش گندله‌سازی

- ۱- توحیدی ن؛ وقار. ر؛ ۱۳۷۶؛ "آماده سازی بارکوره های تولید آهن و فولاد"؛ دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ انتشارات چاپ دانشگاه تهران.
- ۲- توحیدی ن؛ ۱۳۸۱؛ "احیای مستقیم - تئوری تولید آهن اسفنجی" دانشگاه تهران؛ ج ۱
- 3- Seija Forsmo, "Influence of Green Pellet Properties on Pelletizing of Magnetite Iron Ore" "Lulea University 2007.
- 4- Komar Kawatra, s. Timothy C. Eisele, 2013, "Production of pig iron by utilizing biomass as a reducing agent", International Journal of Mineral Processing, Volume 119, pp. 51-57
- 5- Y. INADA, R&D, "Kobe Steel Engineering Reports", Vol.50, No.3(2000), pp.86-89
- 6- Orth A., Kerstiens B., 2004 "International Nickel Symposium-Roasting and Smelting"; The Minerals, Metals & Materials Society
- 7- D. Ameling, Dr. Ing. H. Bodo Lungen, Der Hochofen-stationen seiner entwicklung, 100Jahr hachofenausschuss, Dusseldorf, Dutchland, 2007
- 8- U.S.A Geological Survey, Mineral Commodity Summary Year Book 1999-2008.Unit Iron
- ۹- نعیمی ت؛ ۸۷؛ "انقلاب فنی برای تولید آهن خام مذاب در راه است"؛ سازمان توسعه نوسازی معادن ایران؛ هفته نامه تخصصی معدن و توسعه؛ ش ۲۹۲
- 10-Nuber D. et al., "Advanced Fluidized Bed Technologies for the Iron and Steel Industry", 7th Middle East Iron & Steel Conference, Dubai, 2003
- 11- Outo kumpu, 2005 "Pelletizing Technology for iron ore, boruchure", September
- 12- Andreas Orth1, Stuart Sneyd2, 2005," Front End Technologies for Direct Smelting Processes Determining the Optimum Combination", John Floyd International Symposium on SUSTAINABLE DEVELOPMENTS IN METALS PROCESSING, July 3 - 6, 2005, Melbourne, Australia
- 13-Atwell, W., "Global Steel Watch", Morgan Stanley Equity Research, 3 September 2004

14-S.R.B. Cooke, W.F. Stowasser, "The effect of heat treatment and certain additives on the strength of fired magnetite pellets", Transactions AIME 193 (1952) 1223-1230.

15-D. Papanastassiou, G. Bitsianes, "Mechanism and kinetics underlying the oxidation of magnetite in the induration of iron ore pellets", Met. Trans. 4 (1973) 487-496.

16-S.P.E. Forsmo, P-O. Samskog, B.M.T. Björkman, "A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness", Sent to Powder Technol. for publishing, POWTEC-D-06-00303

17-V. Niiniskorpi, "Development of phases and structures during pelletizing of Kiruna magnetite ore", Doctoral thesis, Åbo Akademi University, Report 04-03, 2004.

18-<http://www.yjc.ir/fa/news/> . 18/11/2014.