

## بهینه کردن دبی مصرف هوا فن‌های زون ۱ و ۲ خنک‌کننده دوار کوره پخت بمنظور بهبود پارامترهای CCS و FeO گندله تولیدی در فولاد بوتیای ایرانیان

حجت زاهدی<sup>۱</sup>، حسن رضایان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> کرمان، کرمان، شرکت فولاد بوتیای ایرانیان، مرکز تحقیق و توسعه، واحد گندله‌سازی

### چکیده

یکی از مهمترین فرآیندها در سخت کردن گندله خام، مرحله پیشگرم است. اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت مهمترین واکنشی است که در مرحله پیشگرم رخ می‌دهد. در نتیجه از پارامترهای مهم کیفی در گندله سازی میزان افزایش استحکام فشاری گندله‌ها ( $CCS^2$ ) و کاهش اکسید آهن و ستیت (FeO) در محصول نهایی است. عوامل متعددی از جمله خواص فیزیکی و شیمیایی کنسانتره و شرایط کنترلی فرآیند در پارامترهای مذکور موثرند. در این مقاله مصرف دبی فن‌های زون ۱ و ۲ سیستم خنک‌کننده دوار کوره پخت (انولار کولار) در راستای بهبود وضعیت CCS و FeO مطالعه شد. نتایج نشان داد با افزایش دبی فن زون ۲ و کاهش بهینه دبی فن زون ۱، CCS خروجی گندله‌ها از میانگین  $270 \text{ Kg/P}$  به  $310$  افزایش و میزان FeO گندله‌ها از میانگین  $1/5\%$  به  $0/5\%$  کاهش یافت.

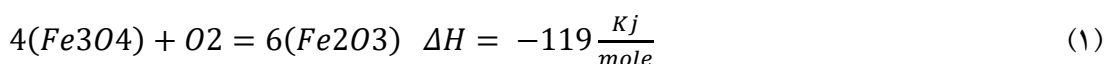
**کلمات کلیدی:** گندله سازی، فن خنک‌کننده، استحکام فشاری، اکسیداسیون، فولاد بوتیای ایرانیان.

<sup>1</sup> zahedi\_h90@yahoo.com

<sup>2</sup> Cold Crush Strength

## مقدمه

در سال‌های آتی به دلیل نیاز، رشد عظیمی در تولید فولاد با کیفیت بالا به وجود خواهد آمد. کارخانه های گندله سازی همواره با آیت‌هایی موثر بر کیفیت گندله پخته شده از جمله افزایش بهینه CCS، کاهش FeO و حذف گوگرد دست به گریبان بوده اند. کاهش CCS در فرایند احیا به ویژه در روش احیا مستقیم موجب ایجاد نرمه و کاهش شرایط احیا به دلیل عدم نفوذ گازهای احیا کننده به لایه‌های مختلف گندله می‌شود. افزایش FeO نیز در فرایند احیا موجب کاهش درصد احیا پذیری به دلیل وجود اکسید آهن دو ظرفیتی در لایه‌های مختلف گندله می‌شود [۱]. در مرحله ی پیشگرم گندله (در تراولینگ گریت)، مگنتیت عمدتاً اکسید شده و به هماتیت تبدیل می‌گردد. این واکنش یک فرآیند گرمازاست و باعث افزایش استحکام گندله می‌شود، اما در این واکنش عملاً تمام  $Fe_3O_4$  اکسید نشده و مقدار ۰/۰۵ تا ۲ درصد از آن به صورت FeO در گندله باقی می‌ماند [۱-۳]. سرعت فرآیند پیشگرم (زون ۳ تراولینگ گریت) که از زون ۲ خنک کننده دوار تامین می‌شود، بیش‌تر به اکسایش مگنتیت وابسته است. در سخت کردن گندله های مگنتیتی زمان پیشگرم شدن طولانی‌تر و زمان پخت کوتاه‌تر می‌باشد. اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت واکنشی به شدت گرمازاست. در فرمول شماره ۱ نحوه اکسیداسیون مگنتیت به هماتیت آورده شده است که با توجه به اصل لوشاتلیه با افزایش مصرف هوا (اکسیژن) واکنش در جهت حذف FeO پیش می‌رود [۱-۳].



در عملیات گرمادهی مگنتیت در محیط اکسید کننده سه مرحله اصلی مشاهده می‌شود. در مرحله اول اکسیداسیون در دمای پایین و زیر ۴۰۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود. بعد از آن مرحله دوم اکسیداسیون بین دما ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ کامل می‌شود.

مقادیر ناچیز FeO باقیمانده در گندله باعث کاهش شدید احیاپذیری و درجه متالیزاسیون<sup>۱</sup> DRI می‌گردد [۱]. عوامل مختلفی بر روی افزایش CCS و کاهش FeO موثر است [۱-۳]. که در ابتدا به صورت مختصر به توضیحاتی در این رابطه پرداخته می‌شود. دانه بندی کنسانتره استفاده شده از جمله ویژگی های فیزیکی است که تاثیر زیادی بر افزایش استحکام گندله خام و پخته به واسطه ایجاد نیروی های موئینگی دارد [۳]. در منابع مختلف بلین یا سطح ویژه بین ۱۶۰۰ الی ۲۰۰۰ سانتی متر مربع بر گرم مناسبترین مقدار جهت دستیابی به حداکثر مقدار بهینه CCS و FeO مناسب معرفی شده است. کاهش بلین با توجه به کاهش نیروهای بین ذرات باعث ایجاد ترک‌هایی در سطح گندله خام و افت CCS و FeO می‌شود [۲]. افزایش مصرف چسب بنتونیت سبب می‌شود که  $SiO_2$  موجود در آن با FeO حاصل از واکنش اکسیداسیون تولید

<sup>1</sup> Direct Reduced Iron

فایالیت کند، اما چون FeO موجود در فایالیت در موقع پخت گندله اکسید نمی شود، به صورت FeO در گندله باقی خواهد ماند. این در حالی است که حضور آهک در گندله باعث می شود  $\text{SiO}_2$  بیشتر به سیلیکات کلسیم تبدیل شود و مقدار کمتری از آن به فایالیت تبدیل گردد [۱-۳]. لذا شرایط بازیسته کنسانتره در فرآیند پخت کارخانه گندله سازی از جمله عوامل موثر است. وجود برخی از عناصر از جمله گوگرد که CCS و FeO را تحت تاثیر قرار می دهد و مقدار بیش از حد مجاز باعث کاهش خواص گندله می گردد [۱-۳]. شرایط بازیسته کنسانتره و PH آب مصرفی چه در تولید کنسانتره چه به هنگام اضافه کردن در کارخانه گندله سازی جهت دستیابی به رطوبت مناسب از جمله عوامل موثر دیگر می باشند [۱-۳]. شرایط کنترل دمایی، هوادهی مناسب، انجام کامل اکسیداسیون مگنتیت و انجام مناسب فرآیند زینترینگ از جمله شرایط کنترلی در بهبود CCS و FeO می باشند. در شرایطی که کنسانتره با خواص شیمیایی و فیزیکی نامناسب جهت تولید استفاده می گردد ایجاد راه کارهای مناسب جهت دستیابی به بهترین کیفیت حائز اهمیت است [۱-۳]. در کنار موضوعات ذکر شده موضوع پر اهمیت دیگر تکنولوژی و ابعاد تجهیزات طراحی شده برای دادن فرصت و گرمای کافی به تبدیل کنسانتره مگنتیتی به گندله هماتیتی است در این خصوص با توجه به عدم دسترسی به کنسانتره مطابق طرح و تامین مواد از مبادی مختلف و بعضاً با FeO بالا تصمیم گرفته شد طی یک فرآیند پژوهشی راهکارهای تولید محصوله گندله کیفی در این شرایط مورد بررسی قرار گیرد. هدف تحقیق انجام شده تعیین درصد مناسب و بهینه میزان مصرف فن های زون های ۱ و ۲ سیستم کولینگ به عنوان پارامتر موثر در تعیین و بهبود CCS و FeO (جهت دسترسی به گندله با FeO زیر یک از کنسانتره با FeO بالا ۲۶ درصد) می باشد. طراحی گندله سازی شرکت فولاد بوتیای ایرانیان بر اساس تکنولوژی آلایس چالمرز می باشد که اصل فرایند زینترینگ در کوره دوار پخت و اکسیداسیون در درون زنجیر تراولینگ گریت اتفاق می افتد.

### روش تحقیق

در این تحقیق بر اساس کنسانتره ورودی به شرکت فولاد بوتیای ایرانیان از تامین کنندگان زرنده ایرانیان ۵۰ درصد (معدن جلال آباد زرنده)، سیرجان ایرانیان ۵۰ درصد (معدن شماره ۴ گلگهر سیرجان) استفاده شده است. جهت دستیابی به تاثیر مصرف فن های زون ۱ و ۲ از ۵ نمونه آزمایشی و هر نمونه به مدت ۸ ساعت در خط تولید استفاده گردید. روش نمونه برداری هر ۲ ساعت یکبار از مخلوط پایل تولید شده است و آنالیز نتیجه توسط دستگاه CCS و تیتراسیون FeO انجام می شود. خواص فیزیکی و شیمیایی مخلوط کنسانتره مگنتیتی ۵ نمونه آزمایشی در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. درصد وزنی مخلوط کنسانتره و بنتونیت نیز در جدول ۲ آورده شده است. مواد پس از اختلاط در تجهیز میکسر در دیسک های ناحیه

پلتایزینگ به سایز ۹ الی ۱۶ میلی متر تبدیل می شوند. پس از تشکیل به تراولینگ گریت جهت خشک شدن و پیش پخت اولیه و در نهایت جهت فرایند زینترینگ به کوره دوار فرستاده می شوند. محصول نهایی پس از خنک شدن در خنک کن دوار به یارد مواد محصول منتقل می گردد. جهت تست عملکرد نمونه ها کلیه شرایط دمایی و سرعت تولید ثابت و در جدول ۳ نشان داده شده است. در جدول ۴ نیز میزان دبی هوا ورودی به سیستم خنک کننده دوار پخت بوسیله دو فن زون ۱ و ۲ با مشخصات یکسان ( ۵۰۰ کیلو وات و ۶۶۰۰ ولت ) آورده شده است. با توجه به مشخص بودن میزان دبی هوا در درصدهای مختلف دمپر فن ها مقیاس اندازه گیری نمودارها براساس باز بودن دمپر و میزان دبی فن های خنک کننده دوار محاسبه شد. آزمایش استحکام فشاری و آنالیز اکسید آهن بر روی گندله های پخته با سایز ۱۰ تا ۱۲ میلی متر انجام شد. همانطور که گفته شد عوامل فیزیکی، ترکیبات شیمیایی کنسانتره ورودی و روش های کنترلی تاثیر بسزایی بر روی CCS و FeO گندله پخته دارد. با توجه به اینکه در حین بهره برداری دماهای کوره دوار با کنترل میزان سوخت گاز ثابت نگهداشته شد و همچنین فید ورودی به داخل تراولینگ گریت و سرعت آن نیز در مدت زمان ثابت و در حدود ۲/۵ متر بر دقیقه قرار داده شد. اثر گذاری میزان مصرف فن های زون ۱ و ۲ سیستم خنک کننده دوار و تاثیر آن بر فرآیند پخت و اکسیداسیون محاسبه شد. قابل ذکر است طراحی سیستم پخت گندله سازی فولاد بوتیای ایرانیان به نحوی است که دمنده گی هوا فن زون ۱ خنک کننده دوار به درون کوره دوار و هوا زون ۲ به درون زون ۳ تراولینگ گریت انتقال می یابد. پارامترهای کیفی CCS و FeO گندله های تولیدی در شرایط و وضعیتی که دمپر فن های ۱ و ۲ در مقادیر ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰٪ قرار داشتند مقایسه شدند.

## نتایج و بحث

نمودار شکل ۱ شامل مقایسه نتایج بدست آمده از آنالیز CCS در هر ۲ ساعت یکبار برای نمونه های مورد آزمایش تحت شرایط کنترلی جدول شماره ۳ می باشد. همانطور که در نمودار شکل ۱ مشاهده می شود بیشینه CCS بدست آمده در شرایطی است که وضعیت دمپر فن زون ۱ در حالت ۴۰ و ۶۰ درصد قرار دارد ( در حدود ۳۰۰ کیلو گرم بر پلت ). زمانی که دمپر فن زون ۲ در کم ترین مقدار خود (۲۰٪) قرار دارد کم ترین مقدار CCS نیز ( زیر ۲۷۰ کیلو گرم بر پلت ) بدست آمده که ناشی از ایجاد مکش بیش تر و تامین نشدن هوا مورد نیاز واکنش سوختن گندله ها در کوره دوار است. همچنین زمانی که مقدار دمپر فن زون یک افزایش می یابد و از مقدار ۶۰٪ عبور می کند مجددا نمودار CCS تمامی نمونه ها کاهشی می شود که ناشی از افزایش هوا خنک به مقدار مازاد در کوره دوار می شود که باعث می شود شیب فرآیند نمودار زینترینگ دچار تغییر شود و مازاد هوا خنک و سرد شدن سریع تر گندله ها در کوره دوار افت CCS

را به همراه داشته باشد. همچنین تقریباً بیشترین مقدار CCS گندله‌ها در درصد ۶۰٪ دمپر فن زون ۲ بدست آمد. در نتیجه می‌توان بهترین دمپر برای بهبود و افزایش CCS گندله‌های در بازه دمپ‌های ۴۰ و ۶۰٪ فن زون یک و ۶۰٪ فن زون دو دانست. لذا می‌توان نتیجه گرفت مصرف فن زون ۱ تاثیر مستقیم و بیش‌تری از زون ۲ بر روی CCS دارد و میزان آن باید بهینه باشد. نتایج در شکل ۲ نشان داد دمپر ۶۰ درصد فن زون ۱ بهینه‌ترین حالت در کاهش پارامتر FeO می‌باشد. نمودار شکل ۲ نشان می‌دهد با افزایش مصرف فن زون ۱ از ۲۰ تا ۶۰٪ و افزایش مصرف اکسیژن دمیده شده به ناحیه پخت مقدار FeO گندله تولیدی بدلیل هوادهی بیش‌تر به گندله‌ها کاهش می‌یابد اما از درصد دمپر ۶۰ به ۱۰۰ فن زون یک مشاهده می‌شود مجدداً مقدار FeO افزایش یافته است که می‌توان این اتفاق را ناشی از تجمع میزان اکسیژن در زون ۱ خنک‌کننده دوار دانست که بدلیل کاهش جنبش مولکولی اتم‌های اکسیژن و اشغال شدن فضا لازم، میزان عبور هوا مورد نیاز واکنش اکسیداسیون از بین گندله‌ها کاهش می‌یابد لذا شاهد افزایش پارامتر FeO هستیم. اهمیت حفظ دما برای زون ۲ آنولار و استفاده در زون ۳ گریت هم بسیار حائز اهمیت است. در این خصوص با کنترل دمپر و فلو فن زون ۱ میزان CCS بهینه می‌شود و با استفاده از کنترل دما در زون ۲ آنولار به حذف FeO و شروع فریند اکسایش در زون ۳ تراولینگ گریت کمک می‌شود. با افزایش میزان مصرف فن زون ۲ خنک‌کننده دوار میزان FeO کاهش بیش‌تری دارد که می‌توان این قضیه را توجیه نمود که بعلت اینکه ۸۰٪ فرآیند اکسیداسیون در تراولینگ زنجیر گریت اتفاق می‌افتد و ۲۰٪ باقیمانده در تجهیزات کوره پخت و خنک‌کننده دوار، لذا سهم زون دو خنک‌کننده دوار در میزان حذف FeO باقیمانده کم‌تر از زون ۱ آن است در نتیجه مقدار اندک FeO عبوری از زون ۱ به زون ۲ ناحیه خنک‌کننده دوار نیازمند بیشینه هوا و دمنده‌گی از فن زون ۲ آن بمنظور حذف می‌باشد. بنحوی که با افزایش میزان مصرف اکسیژن در زون ۲ خنک‌کننده دوار در دمپ‌های ۸۰ و ۱۰۰ شاهد کاهش مقدار FeO به کم‌تر از ۱٪ هستیم. با تفسیر نتایج نمودارهای شکل ۲ میزان بهینه مصرف فن‌های زون ۱ و ۲ ناحیه خنک‌کننده دوار جهت حذف و کاهش بیشینه پارامتر FeO در دمپ‌های ۶۰ و ۱۰۰ درصد بدست می‌آید.

### نتیجه‌گیری

با استفاده از بهینه کردن مقدار مصرف فن‌های زون ۱ و ۲ سیستم کولینگ پخت می‌توان در جهت بهبود پارامترهای CCS و FeO گندله تولیدی در تکنولوژی آلایس چالمر اقدام نمود. نتایج نشان داد که دمپ‌های ۴۰ الی ۶۰ درصد فن زون ۱ بیش‌ترین تاثیر در افزایش CCS و کاهش FeO را داشت و همچنین در درصدهای ۶۰ و ۱۰۰ دمپر فن زون ۲ به ترتیب بیش‌ترین تاثیر در افزایش CCS و کاهش FeO را بدست آوردیم. از مزایای بهینه کردن شرایط هوادهی ناحیه پخت علاوه بر بهبود کیفی محصول نهایی می‌تواند موجب ارزش افزوده و کاهش هزینه‌های تولید گردد.

## تشکر و قدردانی

از مدیریت های گندله سازی، کنترل کیفی و تحقیق و توسعه فولاد بوتیای ایرانیان در راستای حمایت و پشتیبانی های خود در فراهم نمودن این مقاله، کمال سپاسگزاری و تشکر را داریم.

## مراجع

- [1] A. P. Allen, S. Forsmo, j. G. Longely, "Iron ore palletization", US, 1987.
- [2] S.P.E. Forsmo, , A.J. Apelqvist, B.M.T. Björkman and P.O. Samskog, "Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder", Powder Technology, 2006, 169, 147-158.
- [3] S.P.E. Forsmo, P.O., Samskog , and 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", Powder Technology, 2008, 181, 321-330.

جدول ۱- خواص فیزیکی و شیمیایی مخلوط کنسانتره ۵ نمونه آزمایشی.

Sample	Blain No.	% Fe	% FeO	% P	% S	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% CaO	% MgO
No. 1	1100	۶۶/۸	۲۵/۵	۰/۰۴	۰/۹	۰/۵	۰/۴	۰/۵	۲/۷
No. 2	1118	۶۶/۶	۲۵/۴	۰/۰۴	۰/۷	۲/۲	۰/۴	۰/۴	۳/۲
No. 3	1150	۶۶/۶	۲۵/۴	۰/۰۵	۰/۸	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۲/۸
No. 4	1155	۶۶/۶	۲۵/۲	۰/۰۵	۰/۹	۲/۶	۰/۵	۰/۵	۲/۶
No. 5	1157	۶۶/۵	۲۵/۵	۰/۰۴	۰/۸	۲/۴	۰/۴	۰/۹	۲/۴

جدول ۲- درصد وزنی ترکیبات استفاده شده.

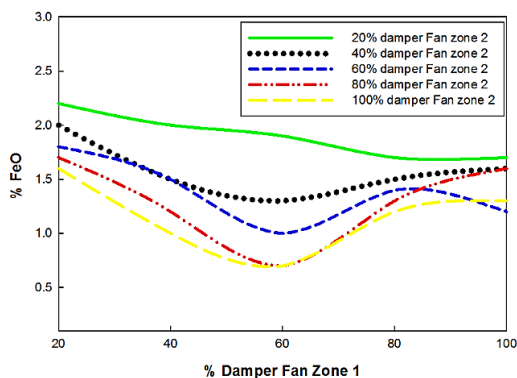
Material	Concentrate %	Bentonite %
No. 1	۹۶/۵	۳/۵
No. 2	۹۷	۳
No. 3	۹۷/۵	۲/۵
No. 4	۹۸	۲
No. 5	۹۸/۵	۱/۵

جدول ۳- شرایط دمایی کوره دوار و سرعت تراولینگ گریت.

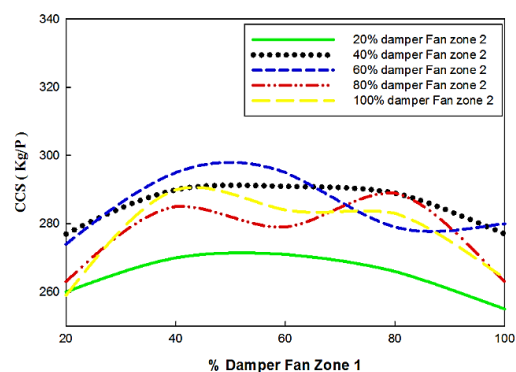
متوسط سرعت زنجیر تراولینگ گریت	متوسط فشار هد	متوسط دمای تیل	متوسط دمای هد	متوسط دمای مرکز پخت
کوره	کوره	کوره	کوره	کوره
۲/۵ متر بر دقیقه	- 50 pa	880 °C	1050 °C	1250 °C

جدول شماره ۴- میزان دبی هوا فن‌های کولینگ پخت در درصد دمپ‌های مختلف.

100	80	60	40	20	% دمپ فن
150000	120000	90000	60000	30000	دبی / $m^3$ $\pm 1500$



شکل ۲- میزان FeO گندله خروجی به نسبت دمپ‌های مختلف فن‌های کولینگ کوره پخت.



شکل ۱- میزان CCS گندله خروجی به نسبت دمپ‌های مختلف فن‌های کولینگ کوره پخت.

